

Titre: Étude des causes de dégradation du marquage au sol sur les routes
du Québec
Title:

Auteur: Alexandre Lacoffe
Author:

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lacoffe, A. (2014). Étude des causes de dégradation du marquage au sol sur les
routes du Québec [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1537/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1537/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Martin Trépanier, & Nicolas Saunier
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES CAUSES DE DÉGRADATION DU MARQUAGE AU SOL SUR
LES ROUTES DU QUÉBEC

ALEXANDRE LACOFFE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DES CAUSES DE DÉGRADATION DU MARQUAGE AU SOL SUR LES ROUTES
DU QUÉBEC

Présenté par : LACOFFE Alexandre

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FAROOQ Bilal, Ph.D, président

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. SAUNIER Nicolas, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. AGARD Bruno, Ph.D, membre

Le Ministère des Transports (MTQ) n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce mémoire. Les points de vue exprimés dans ce mémoire émanent de l'auteur et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du MTQ.

DÉDICACE

« *C'est dans ta tête !* »

Richard Gulzinski

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directeurs de recherche, le professeur Martin Trépanier et le professeur Nicolas Saunier, pour leur aide, leur soutien et leur confiance tout au long de ma maîtrise.

Ce mémoire ne serait probablement toujours pas terminé sans les informations et les éclaircissements fournis par le ministère des transports du Québec, et en particulier par mes interlocuteurs privilégiés, Mme Marie Beauchemin, Mr Michel Tremblay et Mr Dominic Denis, qui ont partagé avec moi leurs connaissances en répondant rapidement et précisément à mes interrogations.

Enfin, j'aimerais remercier les étudiants en génie du Transport et spécialement Félix Soto, Jean-Simon Bourdeau et Galo Reinoso qui m'ont aidé à apprendre un domaine que je ne maîtrisais pas et m'ont soutenu par leur humour et leur bonne humeur lors des journées difficiles.

RÉSUMÉ

Les marquages longitudinaux sont composés de lignes et de symboles peints sur les routes. Ils ont pour but de guider les automobilistes de jour comme de nuit. Leur rôle est donc essentiel dans la sécurité routière. C'est pourquoi de nouvelles normes ont été mises en place par la Federal Highway Administration (FHWA) depuis 2010 aux États-Unis (des normes similaires existent au Québec) concernant la signalisation routière. Celles-ci imposent un seuil minimal de quantité de lumière des phares des véhicules réfléchi par le marquage (la rétroréflexion) pour tous les types de marquages au sol afin de garantir une visibilité suffisante pour les usagers.

Le ministère des transports du Québec (MTQ) constate que, de nos jours, la peinture se détériore de plus en plus rapidement, ce qui implique une repeinte plus fréquente pour répondre aux critères imposés par la norme. Le MTQ cherche à établir les principaux facteurs pouvant influencer la perte de qualité du marquage : c'est l'objectif de ce projet.

Pour répondre à cette question, le ministère a fourni des données qu'il dispose pour certaines routes du Québec :

- les caractéristiques des routes (âge du revêtement de la chaussée, type de route, type de revêtement, milieu, débit journalier moyen annuel de véhicules, vitesse limite, type de marquage, couleur du marquage) ;
- le taux de présence du marquage (appelé durabilité) ;
- la rétroréflexion du marquage ;
- des informations concernant le déneigement (nombre de passages des déneigeuses, quantité de matériaux utilisés, pluie et neige tombée) ;
- les températures, complétées par les données publiques d'Environnement Canada.

Une fois les données recensées et structurées dans une base de données, des indicateurs ont été créés et les variations de durabilité et de rétroréflexion ont été calculées pour déterminer une corrélation entre les indicateurs et la perte de qualité du marquage. L'outil qui a été utilisé est la régression linéaire multiple. Un procédé itératif a permis de trouver les variables corrélées à la variation de durabilité et de rétroréflexion du marquage.

Nous avons remarqué que les pertes de rétro réflexion et de durabilité sont fortement non-linéaires, ce qui signifie que plus ses valeurs initiales sont hautes, plus la perte est grande. Les causes de détérioration se classent en trois grandes catégories :

- les produits de marquage et les caractéristiques de la chaussée : les marquages à base de peinture à l'eau s'effacent plus vite que les autres. De même, l'âge du revêtement sur lequel est posé le marquage a un impact sur la perte de qualité.
- l'environnement, avec l'hiver et l'entretien hivernal : il semble évident que le passage des déneigeuses avec la lame au sol, les abrasifs utilisés pour améliorer l'adhérence des véhicules sur la neige et la glace et les variations de températures au-dessus et en dessous du zéro contribuent à la détérioration du marquage. Cependant, l'étude montre que les chutes de neige importantes et le sel déposé en abondance pourraient être associés à une dégradation plus faible du marquage.
- la circulation : les conclusions sont plus limitées dans ce cas. La quantité de véhicules semble avoir un impact négatif sur le marquage, mais cela n'est significatif que dans un des modèles.

L'ajout ou le retrait d'un indicateur modifie grandement les résultats. L'idéal serait de collecter plus d'enregistrements, sur une période de temps et une zone d'étude plus larges, quitte à devoir diminuer le nombre de paramètres explicatifs disponibles pour l'ensemble des observations.

ABSTRACT

Pavement marking consists in painted lines and symbols on roads. They are intended to guide motorists during day and night, and as a result their role is essential in road safety. That is why new standards are implemented by the Federal Highway Administration since 2010 in the USA about road safety (similar ones are used in Québec). These require a minimum amount of light reflected from the headlights, called retroreflectivity, for all types of pavement markings to ensure adequate visibility for users.

Nowadays, the Québec Ministry of Transportation (MTQ) finds that the pavement markings deteriorate more quickly, which means more frequent repaint to meet the criteria imposed by the standard. The MTQ desires to find the main factors influencing the degradation of pavement marking.

To answer to this question, the MTQ provided the following data for a subset of the provincial road network:

- road characteristics (age of pavement, road type, type of coating, environment, annual average daily traffic, speed limit, type of pavement marking material, pavement marking color);
- the proportion of pavement marking product left (called durability in Quebec);
- the pavement marking retroreflectivity;
- information about winter maintenance (snowplows runs, amount of materials used, rain and snowfall);
- temperatures, obtained from Environment Canada.

Once the data sources were identified and the datasets integrated into one database, indicators were created, and durability and retroreflectivity variation were calculated to determinate a correlation between indicators and loss of pavement marking quality. The multiple linear regression was used in an iterative process to find good explanatory models.

The first findings of this study are that the losses of durability and retroreflectivity are highly non-linear: the higher the initial value, the higher the loss. Causes of deterioration can be divided in three classes:

- road characteristics: water paint deteriorates faster than others. Similarly, the age of the pavement has an impact on degradation;
- the environment, with the winter maintenance activities: as expected, snowplows traffic, abrasives used to melt snow and ensure vehicle adherence and temperature variation above and below the zero contribute to the pavement marking deterioration. Nevertheless, the study shows that heavy snowfall and salting in abundance may have a protect effect in the marking;
- road traffic: conclusions are more limited in this case. The amount of vehicles seems to have a negative impact on the marking, but it only appears in one of the models.

The addition or removal of an indicator greatly alters the results. Future work should rely on a data collection over a longer time period and a larger area of interest, even if it means some explanatory variables may not be available for the whole dataset.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES	XX
Chapitre 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	2
1.2 Objectif	3
1.3 Structure du document	4
Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Le marquage au sol et la sécurité routière	5
2.2 L'importance de la pose des microbilles de verre	7
2.3 Les matériaux du marquage au sol	9
2.3.1 Les peintures	9
2.3.2 L'époxy	10
2.3.3 Le polyurea	11
2.3.4 Le méthacrylate de méthyle (MMA)	12
2.3.5 Les bandes préfabriquées	12
2.3.6 Comparaison des différents matériaux	13

2.4	Causes de perte de qualité du marquage longitudinal	14
2.4.1	Études globales.....	14
2.4.2	Influence de l'entretien hivernal sur le marquage	19
2.5	Solutions trouvées pour limiter l'usure du marquage	21
2.5.1	Les délinéateurs surélevés (« Permanent Raised Pavement Markers », PRPM)	22
2.5.2	Les marquages incrustés.....	23
2.5.3	Les lames des déneigeuses	26
2.6	Conclusion de la revue de littérature.....	27
Chapitre 3	PRÉSENTATION DES DONNÉES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE.....	28
3.1	Caractéristiques des routes	28
3.1.1	Découpage spatial des routes	28
3.1.2	Types de lignes.....	30
3.2	Tables fournissant les caractéristiques des tronçons de route	33
3.3	Durabilité.....	34
3.4	Rétroreflexion.....	36
3.5	Entretien hivernal	38
3.5.1	Circuits utilisés dans l'étude	38
3.5.2	Collecte de données.....	39
3.5.3	Table circuit origine	40
3.6	Données météorologiques	40
Chapitre 4	NETTOYAGE ET AGRÉGATION DES DONNÉES	42
4.1	Choix de l'unité spatiale d'analyse	42
4.2	Caractéristiques des routes à l'échelle du RTSS	43
4.3	Données de durabilité.....	44

4.3.1	Agrégation des données de durabilité par RTSS.....	45
4.3.2	Ajout de la variable indépendante « type_ligne ».....	45
4.3.3	Ajout des dates de repeinte.....	46
4.4	Données de rétroréflexion	47
4.4.1	Détermination des types de lignes.....	47
4.4.2	Agrégation des données de rétroréflexion.....	48
4.4.3	Dates de repeintes.....	49
4.5	Collecte de l'entretien hivernal 2012/2013	49
4.5.1	Recensement des données	49
4.5.2	Simplification des données.....	51
4.5.3	Ajout de la variable indépendante « type_ligne »	54
4.6	Création d'indicateurs météorologiques.....	54
4.6.1	Lien entre les stations météorologiques et les RTSS	55
4.6.2	Génération des indicateurs météorologiques.....	56
4.7	Conclusion des traitements de données.....	60
4.7.1	Relation entre les données.....	60
4.7.2	Résumé des agrégations et limites des jeux de données	62
Chapitre 5 CALCUL, ANALYSE ET RÉSULTATS DE LA DÉTÉRIORATION DU MARQUAGE 64		
5.1	Calcul des variations de durabilité et de rétroréflexion.....	64
5.1.1	Méthode utilisée	64
5.1.2	Allure des variations obtenues	65
5.2	Corrélations entre les variables	68
5.3	Déterminations des indicateurs significatifs par régression linéaire multiple.....	70
5.3.1	Principe et hypothèses	70

5.3.2	Méthodologie	71
5.3.3	Transformation de données	72
5.3.4	Modèles pour la rétroréflexion.....	74
5.3.5	Modèles pour la durabilité.....	81
5.4	Bilan des modèles de régression linéaire multiple	87
Chapitre 6	CONCLUSION	89
6.1	Contributions	89
6.2	Résultats	89
6.3	Limites de l'analyse	90
6.4	Perspectives d'amélioration	91
BIBLIOGRAPHIE		92
ANNEXES		95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : classification visuelle de la durabilité	2
Tableau 1-2 : Seuils minimaux de rétro réflexion de la FHWA par type de route (mcd/lx/m ²)	3
Tableau 2-1 : réduction des accidents en fonction de la mesure de sécurité	5
Tableau 2-2 : Comparaison des peintures à base d'eau et de solvant	10
Tableau 2-3 : Avantages et inconvénients de l'époxy	11
Tableau 2-4 : Comparaison des matériaux	13
Tableau 2-5 : Comparaison des variables significatives des différentes études	18
Tableau 2-6 : études concluant à un impact de l'entretien hivernal sur les marquages	19
Tableau 2-7 : Profondeur de la rainure et épaisseur de produit en fonction du matériau utilisé (largeur fixe de 102 mm).....	24
Tableau 2-8 : Comparaisons des différents types de lames de déneigeuses	26
Tableau 3-1 : Nom des différentes lignes dans le cas de chaussées contiguës (les acronymes des figures sont définies dans le Tableau 3-3).....	31
Tableau 3-2 : Nom des différentes lignes dans le cas de chaussées séparées (les acronymes des figures sont définies dans le Tableau 3-3).....	32
Tableau 3-3 : Définition des acronymes des différentes lignes	33
Tableau 3-4 : Données utilisées pour le projet dans les tables FMR, BGR et V-155 par RTSS ...	34
Tableau 3-5 : Données utilisées dans la table de durabilité fournie par le MTQ	36
Tableau 3-6 : Données utilisées dans la table de rétro réflexion fournie par le MTQ	38
Tableau 3-9 : Données météorologiques utilisées dans le projet	41
Tableau 4-1 : Référence spatiale des différents jeux de données du projet	43
Tableau 4-2 : Caractéristiques des tronçons utilisés dans l'étude (les attributs en italique sont à agréger à l'échelle du RTSS)	43
Tableau 4-3 : Valeur moyenne de durabilité par classe	45

Tableau 4-4 : Passage d'une classe de durabilité d'une ligne de rive gauche par chaînage à une valeur de durabilité par RTSS	45
Tableau 4-5 : Exemple de table de durabilité avant le découpage par type de ligne	46
Tableau 4-6 : Exemple de table de durabilité après le découpage par type de ligne	46
Tableau 4-7 : Explication des différents caractères permettant de déterminer le type de ligne pour les données de rétroréflexion.....	47
Tableau 4-8 : Exemple de la table de rétroréflexion après le traitement.....	49
Tableau 4-9 : Affectations des mesures de l'entretien hivernal (nombre de passages de déneigeuses) aux différents types de lignes	53
Tableau 4-10 : Exemple de la base de données « entretien_hivernal » avant découpage.....	54
Tableau 4-11 : Exemple de la base de données "entretien_hivernal" après découpage.....	54
Tableau 4-12 : Indicateurs générés grâce aux données météorologiques	59
Tableau 4-13 : Échantillon d'un fichier météorologique d'EC	59
Tableau 4-14 : Méthodes d'agrégation utilisées sur les différentes variables.....	62
Tableau 5-1 : Indicateurs disponibles dans la table générée par le script de calcul de variation de durabilité / rétroréflexion	65
Tableau 5-2 : Régression linéaire de la variation de rétroréflexion (136 enregistrements sur 192, R^2 ajusté de 0,892)	75
Tableau 5-3 : Régression linéaire de la variation de rétroréflexion en considérant les données météorologiques du MTQ (101 enregistrements sur 192, R^2 ajusté de 0,873)	78
Tableau 5-4 : Régression linéaire de la variation de durabilité (1141 enregistrements sur 1869, R^2 ajusté de 0,678)	81
Tableau 5-5 : Régression linéaire de la variation de durabilité en considérant les données météorologiques du MTQ (322 enregistrements sur 1869, R^2 ajusté de 0,600)	84
Tableau 5-6 : Comparaison des différents modèles de régression linéaire multiple (+ (resp. -) signifie que la variable est significative de coefficient positif (resp. négatif))	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Rétroreflexion du marquage au sol	2
Figure 2-1 : Variations d'enfoncement de la microbille de verre.....	7
Figure 2-2 : Distribution des billes dans un marquage au sol.	8
Figure 2-3 : Enfoncement d'une bille de même rayon dans 2 types de liant.....	8
Figure 2-4 : Variation de l'état du liant en fonction de la vitesse de pose de la bille.....	9
Figure 2-5 : comparaison de la dégradation des thermoplastiques au cours du temps, avec et sans entretien hivernal.....	20
Figure 2-6 : régressions des différents indicateurs choisis par l'auteur (performance du marquage : 1 = Excellente, 2 =Bonne, 3 = Correcte, 4 = Mauvaise, 5 = Critique).....	21
Figure 2-7 : Délinéateurs surélevés en condition de nuit.	23
Figure 2-8 : Géométrie des bandes rugueuses dans l'Indiana.....	25
Figure 2-9 : Géométrie des bandes rugueuses incrustées.....	26
Figure 3-1 : Exemple présentant les concepts. Distinction entre le circuit (en vert), le RTSS (en jaune et en rouge) et le chaînage (en bleu). Le circuit 01 est composé de 8 RTSS (4 en rouge et 4 en jaune) et le RTSS 0000501010000D est composé de 5 chaînages.....	29
Figure 3-2 : Exemple de codage du RTSS	29
Figure 3-3 : État visuel du marquage en fonction de sa classe.	35
Figure 3-4 : Nombre de relevés de durabilité par mois (pour l'étude de l'impact de l'entretien hivernal)	36
Figure 3-5 : Rétroreflectomètre Ecodyn du MTQ (à gauche) et visibilité du marquage la nuit en fonction de la rétroreflexion (à droite).	37
Figure 3-6 : Répartition des mesures avant et après l'hiver pour les années 2012-2013.....	37
Figure 3-7 : Fiche d'entretien hivernal de XXXXX (circuit XXXXXX) pour le début du mois de Mars 2013.....	39

Figure 4-1 : Exemple d'utilisation de la méthode d'agrégation de l'exigence de déglacage d'un RTSS	44
Figure 4-2 : Algorithme de détermination de la ligne en fonction du RTSS, du nom du fichier et des valeurs de chaînage	48
Figure 4-4 : Schéma illustrant la détermination de la station la plus proche	55
Figure 4-5 : Exemple d'un fichier EC avant et après la compilation.....	57
Figure 4-6 : Liens entre les tables de données	61
Figure 4-7 : Distance entre les RTSS et leur station EC (figure du dessus) ou leur SMR (figure du dessous) la plus proche trié par ordre croissant.....	63
Figure 5-1 : Variation de durabilité en fonction de la durabilité initiale.....	66
Figure 5-2 : Variation de durabilité en fonction du nombre de jours entre deux relevés.....	66
Figure 5-3 : Variation de rétroréflexion en fonction de la rétroréflexion initiale	67
Figure 5-4 : Variation de rétroréflexion en fonction du nombre de jours entre deux relevés	67
Figure 5-5 : Matrice des corrélations des indicateurs météorologiques d'EC pour la variation de durabilité.....	69
Figure 5-6 : Passage d'une variable catégorielle (« peinture ») en trois variables binaires (« eau », « epoxy » et « alkyde ») à l'aide du logiciel Gretl	73
Figure 5-7 : Conversion des variables « type_voie » et « type_ligne » sous Gretl	74
Figure 5-8 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la rétroréflexion.....	76
Figure 5-9 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la rétroréflexion.....	77
Figure 5-10 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la rétroréflexion en considérant les SMR.....	79
Figure 5-11 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la rétroréflexion en considérant les SMR	80

Figure 5-12 : Graphique des valeurs résiduelles en fonctions des valeurs prédites pour la durabilité.....	82
Figure 5-13 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la durabilité	83
Figure 5-14 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la durabilité en considérant les SMR.....	85
Figure 5-15 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la durabilité en considérant les SMR	86
Figure 6-6 : Cas des chaussées contiguës à une voie par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR », 1 et 2 correspondent	96
Figure 6-7 : Cas des chaussées contiguës à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR », 1 et 2 correspondent	97
Figure 6-8 : Cas des chaussées séparées à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR ».....	98
Figure 6-9 : Cas des chaussées séparées à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR ».....	99
Figure 6-10 : Matrice des corrélations des données météorologiques d'EC pour la durabilité ...	100
Figure 6-11 : Matrice des corrélations des données météorologiques d'EC pour la rétroréflexion	101
Figure 6-12 : Matrice des corrélations des données du FMR pour la durabilité	102
Figure 6-13 : Matrice des corrélations des données du FMR pour la rétroréflexion	103
Figure 6-14 : Matrice des corrélations des données de l'entretien hivernal pour la durabilité (à gauche) et la rétroréflexion (à droite).....	104

Figure 6-15 : Matrice des corrélations des données des SMR pour la durabilité..... 105

Figure 6-16 : Matrice des corrélations pour les données des SMR pour la rétroréflexion..... 106

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Pour simplifier la rédaction, les abréviations suivantes sont utilisées dans ce document :

CS	Centre de Service
DJMA	Débit Journalier Moyen Annuel
DJMH	Débit Journalier Moyen Hivernal
DT	Direction territoriale
DVD	Délimitation de Voie de Droite
DVG	Délimitation de Voie de Gauche
EC	Environnement Canada
LC	Ligne Centrale
LRD	Ligne de Rive Droite
LRG	Ligne de rive Gauche
MMA	Méthacrylate de Méthyle
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PRPM	Permanent Raised Pavement Markers (délinéateurs surélevés)
Q-Q	Diagramme Quantile-Quantile
RTSS	Routes, Tronçons, Sections et Sous-routes
SMR	Station Météorologique du ministère des transports du Québec
SRPM	Snowplowable Raised Pavement Markers

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – Codification des mesures de rétroreflexion (en orange) et de durabilité (en vert) en fonction du type de chaussée	96
ANNEXE B – Matrices de corrélation des différents jeux de données utilisés dans l'étude	100

Chapitre 1 INTRODUCTION

La signalisation routière est constituée du marquage horizontal (au sol) et vertical. Le marquage au sol permet de fournir les quatre catégories d'information suivantes :

- la répartition des espaces de déplacement ;
- les règles de conduite ;
- le jalonnement ;
- le stationnement.

Le marquage au sol est regroupé en deux grandes catégories :

- les marques longitudinales (lignes dans le sens de la circulation) ;
- le marquage ponctuel, regroupant les marques transversales (lignes perpendiculaires au sens de la circulation) et les autres marques (flèches par exemple).

Au Québec, il se présente principalement sous les couleurs blanches et jaunes (d'autres couleurs existent pour des cas spécifiques, comme le orange pour les travaux) (*Wikipédia, 2014b*).

Les marquages routiers doivent être suffisamment visibles de jour comme de nuit pour fournir les informations aux usagers. Il est un élément essentiel à la sécurité routière et doit donc être visible dans toutes les situations, de jour comme de nuit. En effet, une étude en Californie des lieux où se produisent les accidents de nuit suggère que la visibilité des lignes au sol était la cause principale des accidents qui n'avaient pas de cause exogène (alcool, fatigue, animal, etc.) (*G. Bahar, Masliah, Erwin, Tan, & Hauer, 2006*).

L'état du marquage et sa visibilité sont mesurés par deux paramètres : la durabilité et la rétroréflexion. La durabilité est le taux de présence de la ligne sur la chaussée, mesurée au Québec en pourcentage de produit restant visuellement par des inspecteurs (*Tremblay, 2004*). Le Tableau 1-1 ci-dessous explique la classification visuelle de la durabilité. La rétroréflexion est la quantité de lumière des phares des véhicules réfléchi par le marquage, mesurée en mcd/lx/m² (millicandelas par lux et par mètre carré) par un rétroréfectomètre.

Tableau 1-1 : classification visuelle de la durabilité

Classe	Taux de présence du marquage (en %)
1	96 à 100
2	75 à 95
3	50 à 75
4	15 à 50
5	0 à 15

La rétro réflexion est rendue possible grâce aux microbilles de verre (réflectrices) incrustées dans le marquage. La Figure 1-1 explique le phénomène (*FHWA, 2010*).

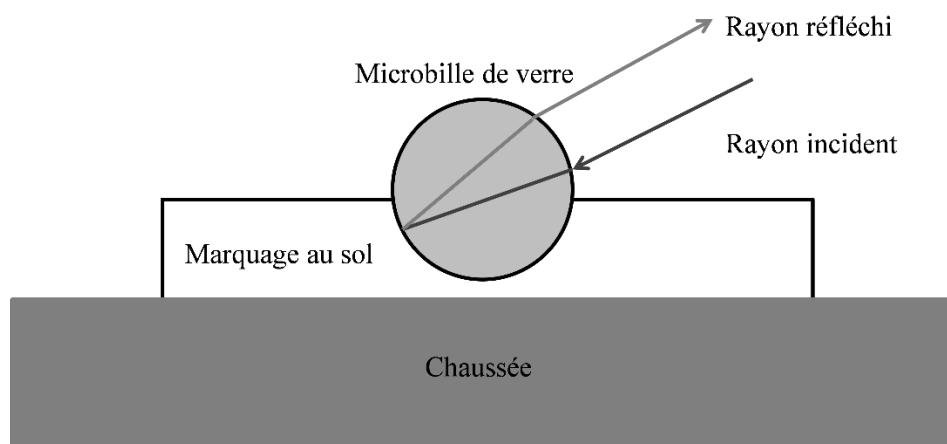


Figure 1-1 : Rétro réflexion du marquage au sol

La composition des lignes est donc essentielle à sa visibilité. Les autres éléments qui le composent sont : un liant ou enduit, un solvant, une couleur (jaune ou blanc au Québec et en Amérique du Nord), des additifs et une matière de charge (*Tremblay, 2008*).

La dégradation de la rétro réflexion oblige les autorités à repeindre un grand nombre de tronçons de route tous les ans. Actuellement, le Québec choisit principalement l'époxy sur les chaussées neuves et la peinture à base d'eau (beaucoup moins cher) pour rafraîchir le marquage usé sur des chaussées anciennes (*Saunier, Brosseau, & Carrasquilla, 2012*).

1.1 Problématique

De nouvelles normes sont en train de se mettre en place aux États-Unis et au Québec concernant la signalisation routière. La FHWA impose depuis 2010 des normes en fonction du type de route (*FHWA, 2010*):

- pour les routes utilisées le jour seulement, pas de rétro réflexion nécessaire ;

- pour les traverses piétonnières, mots et symboles sur la chaussée, rétro réflexion nécessaire sans seuil minimal ;
- pour les autres lignes, rétro réflexion nécessaire avec seuil minimal.

Les seuils de rétro réflexion se résument dans le Tableau 1-2. L'unité est le millicandela par lux et par mètre carré (mcd/lx/m²).

Tableau 1-2 : Seuils minimaux de rétro réflexion de la FHWA par type de route (mcd/lx/m²)

	Vitesse maximale autorisée		
	≤ 30 mph (≈ 48 km/h)	entre 30 et 50 mph (≈ 48 et 80 km/h)	≥ 50 mph (≈ 80 km/h)
Routes de 2 voies contiguës	n/a	100	250
Autres routes	n/a	50	100

Source : (FHWA, 2010)

Une enquête auprès de nombreuses agences de transports américaines et canadiennes arrive à la conclusion que les problèmes de durabilité et de rétro réflexion sont présents en particulier dans les régions où le climat s'apparente à celui du Québec (Saunier *et al.*, 2012). Dans ces régions, l'entretien hivernal est important avec l'usage de déneigeuses et l'utilisation de produits tels que le sel ou des abrasifs pour limiter la quantité de neige sur la route l'hiver, ce qui pourrait avoir un impact sur la perte de qualité des marquages au sol.

1.2 Objectif

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un projet plus large en collaboration avec le MTQ visant à déterminer les interrelations des principaux facteurs influençant ou pouvant influencer la qualité du marquage. Il se concentre sur une collecte de données sur le marquage longitudinal et son environnement lors de l'hiver 2012-2013 sur plusieurs circuits d'entretien hivernal au Québec.

Pour répondre à la problématique, le travail s'est effectué de la façon suivante :

- recherche des facteurs pouvant expliquer la perte de qualité des lignes ;
- conception d'une base de données recensant tous ces facteurs, la rétro réflexion et la durabilité ;
- création d'indicateurs pertinents à partir des données disponibles ;
- recherche des corrélations entre les pertes de rétro réflexion et de durabilité et des autres variables à travers des outils statistiques.

1.3 Structure du document

Le rapport de ce projet de recherche se décompose en cinq parties et suit la démarche du processus de recherche. Dans le chapitre 2 se trouve un état de l'art où l'on présente les études menées pour tenter d'expliquer la dégradation des marquages longitudinaux à travers différents facteurs. La troisième partie recense les facteurs retenus pour l'étude. On y précise le choix, l'origine et l'utilité des données. Le chapitre 4 explique les caractéristiques et les limites des jeux de données mis à disposition et comment ces jeux sont versés et intégrés dans une base de données utilisée pour l'analyse. Un langage de programmation générique est nécessaire pour agréger et créer les indicateurs pertinents, afin de pouvoir expliquer la diminution de la durabilité et de la rétroreflexion. L'avant-dernière partie consiste en une analyse statistique des indicateurs pour faire ressortir des facteurs pouvant causer la détérioration des marquages longitudinaux. Enfin, ce rapport se termine par une conclusion relatant les résultats et les limites de ce projet de recherche, ainsi que les perspectives envisageables.

Chapitre 2 REVUE DE LITTÉRATURE

À travers cette revue, plusieurs notions sont couvertes. Dans un premier temps, le lien entre le marquage au sol et la sécurité routière (à travers la rétroreflexion) est examiné afin de comprendre l'importance de la qualité du marquage. Puis, la relation entre la rétroreflexion et la microbille de verre est traitée pour comprendre la dégradation de la rétroreflexion du marquage. Par la suite, les différents matériaux utilisés pour la peinture sont passés en revue afin de couvrir la composition du marquage. Dans la quatrième section, les facteurs pouvant influencer la dégradation des lignes sont étudiés. L'avant-dernière section relate les solutions trouvées dans différentes régions du monde pour limiter l'usure du marquage. Enfin, une conclusion sur les travaux effectués fait le lien avec le présent projet.

2.1 Le marquage au sol et la sécurité routière

Le lien entre le marquage longitudinal et les accidents de la route fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années. Le marquage au sol permet de communiquer de nombreuses informations aux conducteurs, de l'autorisation de dépassement aux virages de la route. Il est donc nécessaire d'en garantir sa qualité. Une revue de littérature (*Carlson, Park, & Andersen, 2009*) explique les nombreux bénéfices du marquage. L'article cite notamment une étude statistique éloquent par Bahar et al. en 2006 d'une base de données d'accidents avant et après l'instauration de différentes lignes au sol présenté dans le Tableau 2-1 (le coefficient de réduction d'accident correspond à un pourcentage de réduction des accidents en mettant en œuvre la mesure de sécurité, si le coefficient est négatif, c'est que la mesure peut augmenter le nombre d'accidents).

Tableau 2-1 : réduction des accidents en fonction de la mesure de sécurité

Mesure de sécurité	Coefficient de réduction d'accident
Installation de lignes de délimitation de voies sur routes urbaines	18
Installation d'une ligne de centre	-1 à 36
Installation de lignes de centre et de lignes de rive	-3 à 24
Installation de lignes de rive	4 à 66

Source : (*Carlson et al., 2009*)

Le constat est que, peu importe la ligne installée, sa présence est bénéfique pour la sécurité des automobilistes. En effet, un bon marquage permet d'avoir une meilleure compréhension de l'environnement pour l'automobiliste.

L'étude de Rumar (1998) révèle que de nombreux éléments dans la géométrie de la ligne longitudinale modifient le comportement de l'automobiliste, notamment que :

- l'instauration de lignes centrales jaunes diminue leur chevauchement ;
- le conducteur a plus tendance à zigzaguer sur sa voie lorsque les lignes sont moins larges ;
- les usagers ont tendance à s'éloigner des lignes continues (contrairement aux lignes en pointillés) ;
- la diminution de la longueur continue d'une ligne en pointillés engendre des difficultés à suivre la chaussée (augmentation du nombre d'empiètements) (*Rumar, 1998*).

La présence et la géométrie des marquages semblent donc avoir un impact direct sur le comportement des automobilistes. De plus, un sondage publié par le ministère des transports du Dakota du Sud (mentionné dans la revue de littérature de P. J. Carlson) indique que les marquages au sol font l'unanimité chez les usagers en ce qui concerne leur rôle dans la sécurité routière.

Il faudrait savoir si la qualité de ce marquage joue un rôle dans la sécurité des routes. L'étude faite en Caroline du Nord (*Donnell, Karwa, & Sathyanarayanan, 2009*) soutient la thèse que le lien entre la valeur de la rétroréflexion et l'occurrence d'accidents n'est pas évident. Leur recherche, basée sur une étude statistique d'un échantillon d'accidents, fait ressortir qu'il n'y a pas de lien significatif entre la baisse de rétroréflexion et les accidents de jour, mais qu'une augmentation de 50 unités (mcd/lx/m²) de la rétroréflexion diminue globalement la fréquence des accidents de nuit, exception faite pour les lignes de rive de couleur jaune, dont l'augmentation engendrerait une hausse des accidents de nuit. Il faut cependant prendre ce résultat avec des pincettes, car les auteurs rappellent que l'étude est basée sur un très faible échantillon et qu'elle ne concerne qu'une région.

Dans leur étude, Smadi et al. expliquent qu'il ne suffit pas de faire une étude des accidents avant / après repeinte des lignes pour faire ce lien, car on ne tient pas compte de l'aspect détérioration du marquage dans le temps en procédant ainsi (2008). Les auteurs ont donc croisé une base de données recensant les valeurs de rétroréflexion au printemps et à l'hiver dans l'Iowa entre 2004 et 2006 (environ 40000 valeurs) avec la base de données des accidents de la route liés directement à la visibilité des lignes sur les mêmes routes dans la même période. Ils en concluent que si on

observe uniquement les routes dont la rétro réflexion passe en dessous des 200 mcd/lx/m², le lien entre la perte de qualité du marquage et les accidents est significatif (*Smadi, Souleyrette, Ormand, & Hawkins, 2008*).

2.2 L'importance de la pose des microbilles de verre

Le but de cette partie est de décrire la nécessité de la microbille de verre pour assurer la rétro réflexion et l'importance de la méthode de pose.

La vision joue un rôle essentiel dans la prise d'informations nécessaires à la conduite, il faut donc faire en sorte que les informations fournies par le marquage soient visibles de jour comme de nuit. C'est le rôle de la rétro réflexion des marquages au sol et cela est rendu possible grâce aux microbilles de verre incrustées dans les lignes au sol de la plupart des routes.

Pour que les billes puissent renvoyer la lumière des phares, il est nécessaire que celles-ci dépassent du marquage (voir Figure 2-1). Une étude relate que l'enfoncement optimal de la bille est situé entre 40 et 60 % de sa hauteur (*Zhang, Hummer, & Rasdorf, 2009*). Un enfoncement plus important entraînerait une diminution de la rétro réflexion, tandis que le contraire augmenterait les chances d'arracher la bille du marquage.

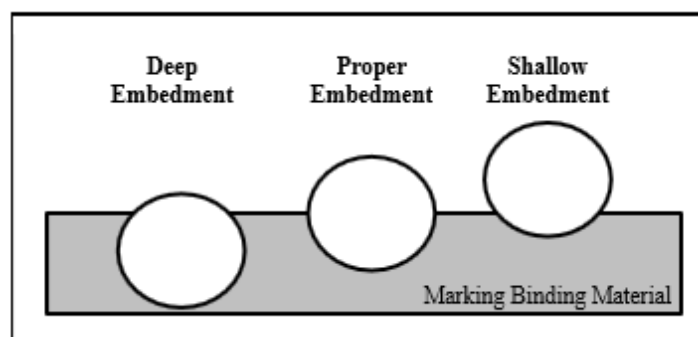


Figure 2-1 : Variations d'enfoncement de la microbille de verre.

Source : (*Zhang et al. 2010*)

D'autres paramètres des microbilles de verre tels que leur volume sont mentionnés par Zhang et al. (2010) et repris dans une revue de littérature (*Hollingsworth, 2012*). La taille des billes étudiées varie d'environ 0,17 à 2,4 µm (0.0059 à 0.0937 mils) dépendamment de son type. Il est expliqué que pour optimiser la surface de rétro réflexion, il est judicieux de varier le rayon des billes afin que de plus petites billes puissent se glisser parmi les plus grosses, comme le montre la Figure 2-2. Zhang ajoute que dépendamment du liant utilisé, l'épaisseur du marquage varie. Il est

donc nécessaire d'adapter le rayon de la bille au type de liant employé afin que la bille ne puisse pas s'enfoncer complètement dans le marquage (Figure 2-3).

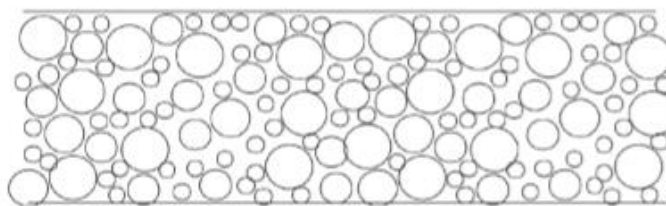


Figure 2-2 : Distribution des billes dans un marquage au sol.

Source : (Hollingsworth 2012)

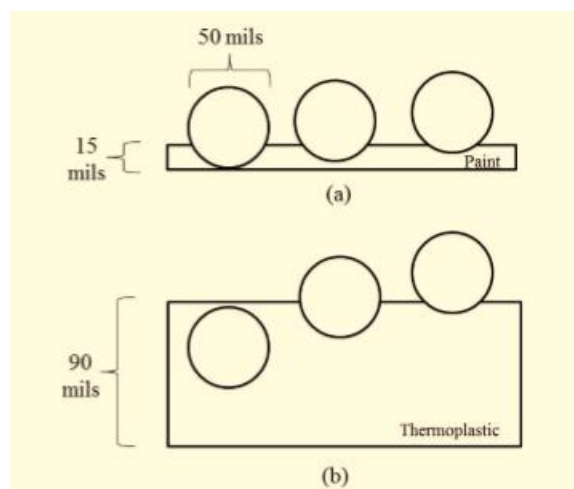


Figure 2-3 : Enfoncement d'une bille de même rayon dans 2 types de liant.

Source : (Hollingsworth 2012)

Hollingsworth mentionne aussi une étude de William Rasdorf de la North Carolina State University dans laquelle on constate qu'à cause de la vitesse de pose du marquage, la rétro réflexion est de 40 à 90 mcd/lx/m² supérieure dans le sens dans lequel le véhicule effectue la pose que dans le sens inverse. À cause de la vitesse du véhicule de pose, l'angle selon lequel les billes sont incrustées n'est pas de 90° par rapport à la route, ce qui engendre un vide du côté de la bille où arrivent les véhicules et un bourrelet du côté opposé, comme le montre la Figure 2-4. Pour avoir un comportement isotrope il faudrait que la bille soit enfoncée à vitesse nulle, ce qui ralentirait considérablement le temps de pose du marquage et donc le trafic durant l'opération.

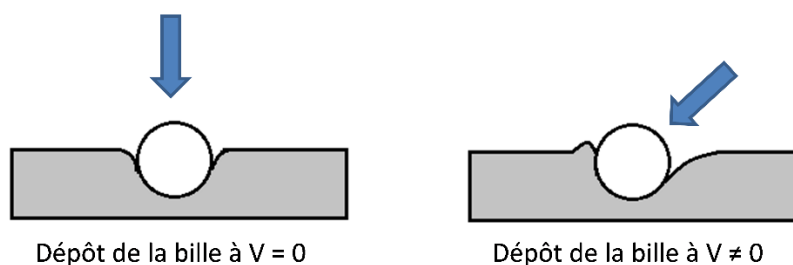


Figure 2-4 : Variation de l'état du liant en fonction de la vitesse de pose de la bille.

Source : (Hollingsworth, 2012)

Il faut donc faire un compromis entre une bonne rétro réflexion avec une bille qui peut se faire arracher à cause de la circulation et une moins bonne réflexion avec une augmentation de la durée de vie du marquage en essayant de limiter le risque d'enfoncement de la microbille dans le liant.

2.3 Les matériaux du marquage au sol

Il existe de nombreux produits utilisés pour composer le marquage au sol, parmi lesquels les peintures à base d'eau et à base de solvant, de loin les plus utilisés à cause de leur faible coût et leur simplicité d'application. Cependant leur durée de vie n'est pas suffisante dans certaines conditions et elles commencent à être remplacées par de nouveaux produits plus coûteux mais aux meilleures performances (Saunier et al., 2012).

Seuls les matériaux utilisés ou testés par le MTQ seront évoqués dans cette revue, à savoir les peintures, l'époxy, le polyurea, le méthacrylate de méthyle (MMA) et les bandes préfabriquées (Tremblay, 2004).

2.3.1 Les peintures

Il y existe deux types de peintures : à base d'eau et à base de solvant (alkydes). Celles à base de solvant sont en train d'être remplacées un peu partout par de la peinture à base d'eau à cause des composants organiques volatiles contenus dans les alkydes qui sont dommageables pour l'environnement (Fu & Wilmot, 2008). Les peintures à l'eau ont la particularité d'être peu coûteuses (0,1 à 0,16 \$ pour 1 m de longueur et 0,1 m de largeur) mais leur durée de vie est très courte. De plus, sa rétro réflexion initiale est plutôt faible (environ 180 mcd/lx/m² pour le jaune et 275 mcd/lx/m² pour le blanc) (Montebello & Schroeder, 2000) : on utilise donc ce type de

marquage sur les routes à faible débit journalier moyen annuel (DJMA) (*Cuelho, Stephens, & McDonald, 2003*).

La peinture dispose d'autres avantages pratiques (*Asdrubali, Buratti, Moretti, D'Alessandro, & Schiavoni, 2013*) :

- sa rapidité d'installation, puisque le véhicule appliquant la couche peut rouler jusqu'à 15 km/h ;
- les microbilles de verre peuvent être directement mélangées au produit ou être appliquées juste après la pose de la peinture sur la chaussée.

Le tableau suivant (Tableau 2-2) résume les caractéristiques des deux types de peinture : latex (à base d'eau) et alkyde (à base de solvants) (*Montebello & Schroeder, 2000*).

Tableau 2-2 : Comparaison des peintures à base d'eau et de solvant

	latex	alkyde
Coût pour 1 pied (30,48 cm) de long et 4 pouces (10,16 cm) de large	0.03 à 0.05 \$	
Durée de vie estimée	9 à 36 mois	
Température d'application	T° air et chaussée > 50°F (10°C)	T° air et chaussée > 32°F (0°C)
Rétroreflexion initiale (en mcd/lx/m²)	180 si jaune 275 si blanc	
Avantages	Très peu coûteux Séchage rapide Bonne durée de vie sur route à faible DJMA	
	Non néfaste pour l'environnement	Peu se poser à faible T°
Inconvénients	Faible durée de vie sur route à DJMA élevé S'abîme au contact de sable / abrasif Nécessite un complément de microbilles Mauvaise adhérence sur le béton	
	La chaussée doit être chaude pour l'application	Hautement inflammable et nécessite des solvants pour nettoyer (mauvais pour l'environnement) Sent mauvais

Source : (*Montebello & Schroeder, 2000*)

2.3.2 L'époxy

Ce matériau a été développé par le ministère des transports du Minnesota dans les années 1970 dans le but d'améliorer la durabilité des marquages au sol (*Gates, Hawkins, & Rose, 2003*). Il est

composé d'une résine et d'un durcisseur que l'on chauffe séparément, et que l'on mélange juste avant son application. La température de la chaussée doit être d'au moins 50°F (soit 10°C) et celle-ci doit être nettoyée avant application du produit. Les microbilles de verre sont ajoutées par la suite. Sa durée de vie est de 2 à 4 ans pour un coût variant de 0,8 à 1 \$ par mètre de longueur (*Montebello & Schroeder, 2000*).

À cause de l'épaisseur de matériau nécessaire pour assurer une bonne adhérence sur la chaussée (0,25 à 0,5 mm), trois fois plus de billes sont nécessaires que pour les autres matériaux pour éviter l'enfoncement des billes dans l'époxy (*Gates et al., 2003*). L'époxy est lent à sécher et nécessite la plupart du temps un contrôle de la circulation le temps que celui-ci ait figé (30 à 40 minutes, mais certains produits peuvent sécher plus vite). Il existe de l'époxy à séchage rapide applicable sur une chaussée froide (jusqu'à 0°C) développé en Italie mais ce genre de matériau est extrêmement coûteux. L'époxy est aussi connu pour se décolorer avec le temps, malgré sa durée de vie élevée (*Asdrubali et al., 2013*).

Le tableau suivant (Tableau 2-3) résume les avantages et les inconvénients de l'époxy.

Tableau 2-3 : Avantages et inconvénients de l'époxy

Avantages de l'époxy	Inconvénients de l'époxy
<ul style="list-style-type: none"> • Très bonne adhésion sur asphalte et béton • Très bonne durée de vie • Nécessite peu de maintenance dans les zones à DJMA élevé • Densité de microbilles de verre élevée, donc meilleure rétro réflexion 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de séchage très long, nécessite un contrôle de la circulation • Nécessite un équipement spécialisé • Plus coûteux que la peinture • La repeinte à l'époxy nécessite une grosse préparation de la surface (qui doit être abrasée)

Source : (*Sadid, Wabrek, & Dongare, 2010*)

2.3.3 Le polyurea

Le polyurea est un thermodurcissable, c'est-à-dire qu'il est composé d'une résine et d'un catalyseur qui, une fois mélangés, donnent un produit solide par polymérisation. Ce matériau est utilisé depuis 1989 et considéré comme un des produits les plus durables, notamment sur les routes à fort DJMA de camions. Ses avantages sont les suivants :

- sa couleur est très durable dans le temps ;
- il sèche en 3 à 8 minutes indépendamment de la température ;

- il peut être appliqué sur une chaussée à une température de 40°F (4°C) et plus ;
- il n'est pas affecté par l'humidité ;
- il a une très bonne adhésion sur le béton et l'asphalte.

Une brève étude du ministère des transports de l'Illinois estime que le polyurea a une durée de vie d'au moins 2 ans. Toutes les qualités de ce produits ont malheureusement un coût élevé : de 3 à 3,2 \$ par mètre de longueur (*Gates et al., 2003*).

2.3.4 Le méthacrylate de méthyle (MMA)

Ce produit est très utilisé dans les régions climatiques extrêmes pour sa grande durabilité et ses conditions d'application. Une étude menée sur trois états aux États-Unis a conclu qu'en Californie et en Alaska, le MMA est le meilleur produit en termes de durée de vie, de durabilité et de visibilité dans les régions à forte chute de neige (*Jiang, 2008*).

Néanmoins, ce produit demeure difficile à poser car il doit être appliqué très lentement (environ 5 km/h) avec de l'équipement spécialisé sur une chaussée préalablement nettoyée et séchée et nécessite au moins 30 minutes de séchage (*Asdrubali et al., 2013*). Une étude de Gates et al. (2003) estime la durée de vie de 6 à 8 ans pour un coût variant de 6 à 10 \$ par mètre de longueur. En conclusion, ce produit est très efficace mais son coût implique de l'utiliser uniquement dans les régions à fortes chutes de neige et à DJMA élevé afin de le rendre rentable.

2.3.5 Les bandes préfabriquées

Comme son nom l'indique, ce matériau n'est pas fabriqué sur le terrain mais en entreprise, pour ensuite être posé sur la chaussée. Il y a deux procédés pour installer ce marquage : il peut être incrusté dans la chaussée neuve à l'aide d'un rouleau qui va enfoncer le matériau dans l'asphalte ou être posé sur la chaussée déjà existante. Dans le deuxième cas, il faut laver et sécher la route très méthodiquement pour que l'adhésion du matériau sur la chaussée soit optimale (*Montebello & Schroeder, 2000*). Dans tous les cas, les bandes sont le matériau le plus difficile à poser, mais si celui-ci est correctement installé, il dispose de nombreux avantages :

- durée de vie très élevée (4 à 8 ans) ;
- rétroréflexion initiale 4 à 6 fois plus élevée que les peintures ;

- excellente adhésion sur tout type de chaussée si bien posé.

La difficulté de la pose et le coût (environ 8 \$ par mètre de longueur) font que ce matériau n'est rentable que sur des routes à fort DJMA (*Gates et al., 2003*).

2.3.6 Comparaison des différents matériaux

Le Tableau 2-4 résume les avantages et les inconvénients des différents types de matériaux utilisés (ou testés) en Amérique du Nord.

Tableau 2-4 : Comparaison des matériaux

	Durée de vie	Coût (en \$, pour 1 pied (30,48 cm) de long et 4 pouces (10,16 cm) de large)	Rétroreflexion initiale (en mcd/lx/m²)	Pose
Peintures	1 an	0,05	180 pour le jaune 275 pour le blanc	Pose rapide Séchage rapide
Époxy	2 ans	0,3	200 pour le jaune 300 pour le blanc	Pose sur chaussée chaude Séchage lent Bonne adhérence
Polyurea	2 à 3 ans	1	800 pour le blanc N/D pour le jaune	Séchage rapide Peut être posé sur chaussée chaude et humide Bonne adhérence
MMA	4 à 8 ans	3	N/D	Pose lente Séchage lent Très bonne adhérence
Bandes	4 à 8 ans	2,5	800 pour le blanc 1100 pour le jaune	Pose très exigeante Très bonne adhérence si bien posé

Source : (*Montebello & Schroeder, 2000*)

Le choix du matériau pour le marquage est donc primordial puisque cela influe directement sur sa durée de vie. Les agences de transports doivent être capables de faire un compromis entre la qualité du marquage au cours du temps et du coût du produit en fonction des conditions climatiques. Le choix se fera selon les causes qui pourraient expliquer la perte de qualité du marquage ; c'est l'objet de la partie suivante.

2.4 Causes de perte de qualité du marquage longitudinal

2.4.1 Études globales

De nombreuses études ont été menées pour tenter de déterminer les causes de l'usure du marquage au sol dans les 20 dernières années. À l'université Concordia, 12 facteurs expliquant la perte de qualité des marquages longitudinaux canadiens ont été recensés (*Shahata, Fares, Zayed, Abdelrahman, & Chughtai, 2008*) :

1. le type de matériau ;
2. le lieu géographique du marquage ;
3. la composition de la circulation ;
4. la qualité de la chaussée ;
5. le type de route ;
6. la limitation de vitesse ;
7. l'âge de la chaussée ;
8. le DJMA ;
9. les conditions météorologiques ;
10. l'état de la chaussée ;
11. le type de revêtement de la chaussée ;
12. les opérations de déneigement.

Le ministère des transports du Texas a déterminé trois grandes catégories de facteurs pouvant expliquer la dégradation (*Hawkins Jr, Gates, & Rose, 2004*) :

- les caractéristiques de la chaussée (facteurs 1, 4, 5, 7, 10, 11) ;
- le trafic (3, 6, 8) ;
- l'environnement (2, 9, 12).

Les études ci-dessous présentent les facteurs ayant une corrélation forte avec l'usure du marquage dans différentes régions d'Amérique du Nord.

En 1995, Cottrell a fait une étude statistique avant / après l'hiver en Virginie pour essayer d'expliquer la cause de la détérioration des marquages. Il en ressort que l'usure est très importante dans le cas des bandes préfabriquées du fait de leur surélévation mais que l'hiver n'a pas d'impact significatif pour les marquages à base de peinture (*Cottrell Jr, 1995*).

Plusieurs États Américains ont fait une analyse de durée de vie sur la durabilité du marquage en 2001. Pour cela, ils ont appliqués des modèles de régression linéaire, exponentiel négatif et quadratique de la rétroréflexion du marquage en fonctions de diverses caractéristiques de la route. Les résultats soutiennent que l'âge du marquage, le débit de voitures, l'environnement, le type de matériau et le type de route sont des facteurs pouvant expliquer la dégradation des lignes. L'étude mentionne une chose intéressante : les études doivent être locales et non globales car les causes de dégradations semblent changer de priorité en fonction de la zone géographique (*Migletz, Graham, Harwood, & Bauer, 2001*).

En Caroline du Sud, une récolte de données de rétroréflexion a été faite sur 149 sites pendant 28 mois. Il en ressort que l'âge du marquage, sa couleur, son matériau et le type de surface sur lequel il a été posé sont significatifs dans la dégradation de la ligne. Les opérations de déneigement ont aussi été testées mais l'auteur ne s'est pas prononcé car elles ne sont pas assez nombreuses dans cette région pour que le résultat soit statistiquement valide (*Thamizharasan, Sarasua, Clarke, & Davis, 2003*).

Dans le Nevada, une étude faite sur des bancs d'essais pour évaluer les matériaux a identifié l'âge du marquage, les opérations de déneigement et les rayons ultraviolets comme étant une cause de dégradation des marquages au sol (*Maurer & Bemanian, 2005*).

Bahar et al. (2006) ont examiné la perte de rétroréflexion et les accidents de la route en fonction de l'âge du marquage, sa couleur, le type de matériau, le DJMA, le type de revêtement de la chaussée, les conditions climatiques de la région et l'entretien hivernal ; chaque facteur étant étudié de façon indépendante. Ils en concluent que tous ces facteurs sauf le DJMA et le type de revêtement pris indépendamment ont un effet de dégradation importante du marquage (*G. Bahar et al., 2006*).

Aux États-Unis, l'Alabama, la Pennsylvanie, le Mississippi, le Minnesota, le Texas et le Wisconsin ont fait l'objet d'une étude de modèle de survie paramétrique pour tenter d'expliquer ce qui pourrait dégrader les marquages longitudinaux. Le résultat est que la couleur du marquage,

le type de pavage, la zone climatique et l'âge de pose du marquage ont un impact significatif sur la perte de rétroréflexion du marquage (*Sathyanarayanan, 2007*).

Une étude statistique a été effectuée en Pennsylvanie sur une base de données de rétroréflexion en s'intéressant au type de marquage, son âge de pose, le type de surface, le type de route, le DJMA et les conditions météorologiques. La conclusion est que ce sont majoritairement les caractéristiques du marquage (couleur, âge et matériau) qui influent sur sa dégradation. Deux remarques supplémentaires viennent étayer leur rapport : les chutes de neiges semblent augmenter de 25 % la durée de vie des lignes blanches¹ et le DJMA semble contribuer à la dégradation des marquages à l'eau (*Donnell, Karwa, & Sasidharan, 2009*).

Dans le New Hampshire, une étude statistique basée sur des régressions linéaires est arrivée à la conclusion que ni le débit de véhicules, ni l'entretien hivernal n'avaient de lien significatif avec les valeurs de rétroréflexion avant et après l'hiver. Cependant, l'auteur n'est pas catégorique et justifie son incertitude en trois points (*Reynolds & Hawkins Jr, 2010*) :

- la rétroréflexion n'a pas été mesurée exactement au même point au printemps et à l'hiver ;
- les données de l'entretien hivernal pourraient avoir été simplifiées par les opérateurs chargés de la collecte de données ;
- les DJMA sont pris près des sites mais pas exactement aux points de mesures de la rétroréflexion.

Une étude de 7 ans de la Air Force Institute of Technology, incluant les opérations de déneigement dans la Caroline du Nord, a abouti à 2 résultats significatifs (*Mull & Sitzabee, 2011*) :

- chaque campagne de déneigement fait perdre environ 1 mois de durée de vie du marquage à l'eau ;
- le DJMA a un impact faible mais significatif sur les marquages à base d'eau.

L'auteur précise que ces résultats doivent être validés via des études dans d'autres États.

¹ Les auteurs attribuent cette augmentation de la durée de vie à des pratiques différentes de pose et d'entretien du marquage dans les régions avec des chutes de neige plus élevées.

Plus récemment dans le même État, la technique des réseaux de neurones sur une base de données de rétro réflexion a tenté d'identifier les raisons de l'usure des lignes. Les facteurs considérés sont l'âge du marquage, son type et sa couleur, le DJMA des voitures particulières et des camions et la localisation géographique. Il en ressort que tous ces paramètres jouent un rôle dans la dégradation du marquage. Les auteurs précisent qu'une étude indépendante des paramètres d'entrée pourrait être faite pour déterminer la cause de l'usure plus précisément (*Karwa & Donnell, 2011*).

Au fil des 20 dernières années, de nombreuses études ont été menées en Amérique du Nord pour tenter d'expliquer le phénomène de dégradation des marquages au sol. Malgré tout, il n'existe pas de réponse complète comme le montre le Tableau 2-5. L'âge de pose du marquage et le type de matériau semblent toutefois sortir du lot puisque toutes les études ayant inséré ces deux indicateurs l'ont fait ressortir de façon significative.

La majeure partie des chercheurs reconnaissent cependant les limites de leurs conclusions. La taille de la base de données, le manque de précision de celles-ci, le manque de facteurs tels que les données météorologiques et l'entretien hivernal sont autant de raisons pouvant mettre en cause les résultats de leurs analyses.

Tableau 2-5 : Comparaison des variables significatives des différentes études

Étude	Éléments étudiés ²	Variables ³								Type de modèle	
		Âge	DJMA	Canions	Déneigement	Zone climatique	Couleur	Type marquage	Type surface	Classe route	
Abu-Lebdeh et al. (2012)	R	+			+			+			Approche descriptive
Bahar et al. (2006)	R, A	+	-		+	+	+	+	-		Régression non linéaire
Cottrell (1995)	R, D				+			+			Tests statistiques
Donnell et al. (2009)	R	+	-			-	+	+	-	+	Régression linéaire
Karwa et Donnell (2011)	R	+	+	+			+	+			Réseaux neuronaux
Lertworawanich et Karoonsoontawong (2012)	R		+								Distribution de Weibull
Lynde (2006)	R, D				+			+			Bancs d'essai
Maurer et Bemanian (2005)	R, C, D	+			+		+	+			Bancs d'essai
Migletz et al. (2001)	R	+	+			+		+		+	Régression linéaire
Mull et Sitzabee (2012), Sitzabee et al. (2009)	R	+	+		+	-			-		Régression par étape
Reynolds et Hawkins (2010)	R	+	-		-						Régression linéaire
Sathyana-rayanan (2007)	R	+				+	+		+		Modèle de survie semi-paramétrique
Smadi et al. (2008)	A	+									Modèle probabiliste (logit)
Thamizha-rasan et al. (2003)	R	+					+	+	+		Régression linéaire
Zhang et Wu (2006)	R	+						+			Spline, ARIMA (séries chronologiques), Bancs d'essai

Source : (Saunier, Lacoffe, Bourdeau, & Trépanier, 2014)

2 A=accidents, C=couleur, D=durabilité, R= rétroreflexion.

3 + indique que la variable a un effet significatif, - indique que la variable a été testée mais ne contribue pas significativement ou que son apport est faible.

2.4.2 Influence de l'entretien hivernal sur le marquage

Dans les études précédemment relatées, peu d'entre elles disposaient de données d'entretien hivernal. De plus récentes études concentrent leurs efforts pour avoir des données sur le passage des déneigeuses de plus en plus précises, afin de tirer des conclusions solides à ce sujet.

Par exemple, Mull et al. (2011) a pris en considération de nombreuses études sur l'impact de la neige dans la dégradation des marquages comme le montre le tableau suivant (Tableau 2-6).

Tableau 2-6 : études concluant à un impact de l'entretien hivernal sur les marquages

Année	Auteurs	Conclusion
1988	Dale	Les chutes de neiges affectent le taux de dégradation du marquage.
1998	Lu et Barter	Perte significative de rétroreflexion en hiver (62 % sur ligne blanche, 21 % sur ligne jaune).
1999	Lee et al.	Forte corrélation entre les chutes de neige et la dégradation.
2001	Migletz et al.	Les opérations de déneigement causent des variations de la durée de vie du marquage.
2003	Sarasua et al.	Le passage des déneigeuses et les autres activités d'entretien hivernal (telles que l'épandage) affectent le marquage.
2004	Kopf	Les déneigeuses usent la chaussée des routes de montagne.
2007	Fitch et Ahern	L'âge et les opérations de déneigement ont une forte corrélation sur la dégradation du marquage.

Source : (Mull & Sitzabee, 2011)

Plus récemment, Monfette (2011) a développé plusieurs modèles pour tenter de prédire la dégradation du marquage. L'auteur a inséré les opérations de déneigement en considérant le nombre de passages des déneigeuses comme une variable continue indépendante et en arrive à la conclusion que cette variable est significative, comme l'illustre la figure suivante (Figure 2-5)

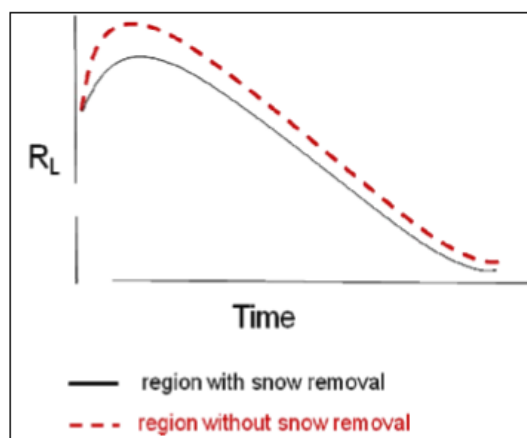


Figure 2-5 : comparaison de la dégradation des thermoplastiques au cours du temps, avec et sans entretien hivernal.

Source : (Monfette, 2011)

L'université Concordia a étudié en 2014 l'influence de différents facteurs ayant un impact sur le marquage à l'alkyde en Ontario, suivant des analyses de régression et de réseaux de neurones. Après avoir étudié l'impact de l'âge de la chaussée, du DJMA global, du DJMA des camions et des opérations de déneigement (voir Figure 2-6), il se trouve que dans tous les cas, la relation est très forte et que la plus significative est obtenue pour le nombre de passages de déneigeuses avec un R^2 de 0.9936 (Elwakil, Eweda, & Zayed, 2014).

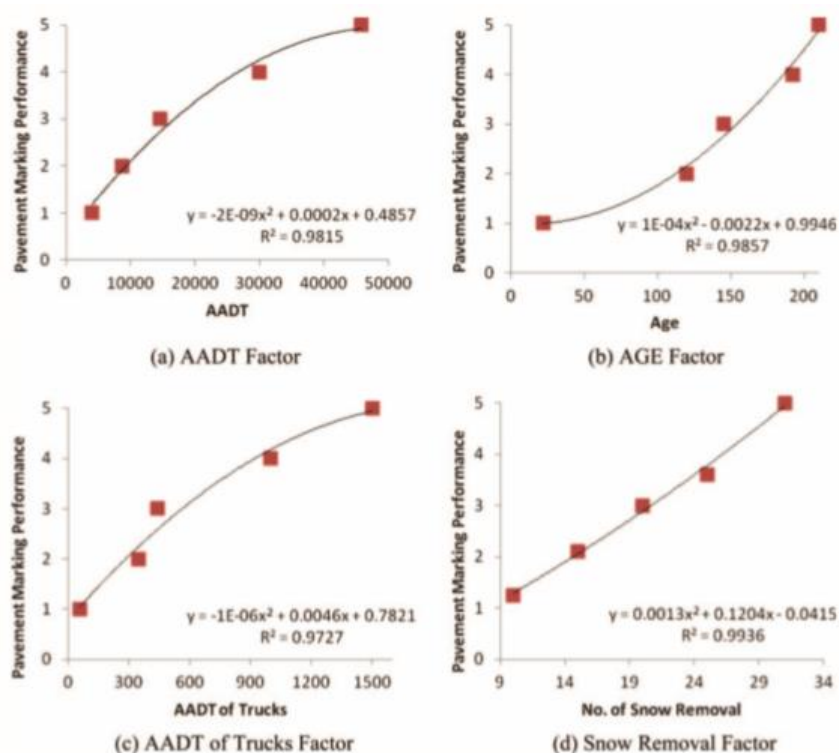


Figure 2-6 : régressions des différents indicateurs choisis par l'auteur (performance du marquage : 1 = Excellente, 2 = Bonne, 3 = Correcte, 4 = Mauvaise, 5 = Critique).

Source : (Elwakil et al., 2014)

Toutes ces études montrent bien que la dégradation des marquages longitudinaux par les opérations de déneigement est un fait avéré. C'est pourquoi de nouvelles technologies sont apparues pour tenter de limiter cette usure.

2.5 Solutions trouvées pour limiter l'usure du marquage

Dans une étude préalable, réalisée pour le MTQ, visant à recenser les problèmes de rétroréflexion et les solutions en place dans le voisinage du Québec, Saunier et al. (2012) ont recensé diverses pratiques pour limiter l'usure du marquage. Deux grandes solutions sont mentionnées à travers cette revue de littérature : les délinéateurs surélevés et les marquages incrustés.

2.5.1 Les délinéateurs surélevés (« Permanent Raised Pavement Markers », PRPM)

Les PRPM ont été conçus pour des raisons de sécurité, à savoir mieux guider les usagers sur les routes, de jour comme de nuit. Ils sont particulièrement efficaces sur les chaussées mouillées et dans des conditions de faible luminosité (*G. B. Bahar, 2004*). Les délinéateurs s'utilisent en complément du marquage au sol et assurent le seuil minimal de rétroréflexion imposé par la FHWA (une photo de PRPM est disponible Figure 2-7). De plus, Agent et al. mentionnent plusieurs études qui affirment que ces dispositifs réduisent les accidents de jour mais surtout de nuit et que ce type de marquage ne se détériore pas à cause du passage des déneigeuses, à condition que les délinéateurs soient posés sur une chaussée neuve. Pour éviter les arrachements pouvant être provoqués par les lames, les SRPM (« Snowplowable Raised Pavement Markers ») ont fait leur apparition dans les années 1980. Une étude dans le Kentucky a fait les conclusions suivantes quant aux performances des SRPM (*Agent & Green, 2009*) :

- ils ont une très bonne durée de vie avec 4,5 % des délinéateurs manquants après l'hiver sur un total d'environ 5800 km (3600 miles) ;
- les problèmes de durée de vie des SRPM sont fortement liés à l'âge de la chaussée (ceux-ci sont posés généralement lors de la construction de la chaussée) ;
- certains délinéateurs sont arrachés à cause des déneigeuses mais cela peut être évité si le matériel est correctement installé et que sa maintenance est bien assurée ;
- les routes avec SRPM ont un taux d'accidents inférieur aux routes qui n'en disposent pas.

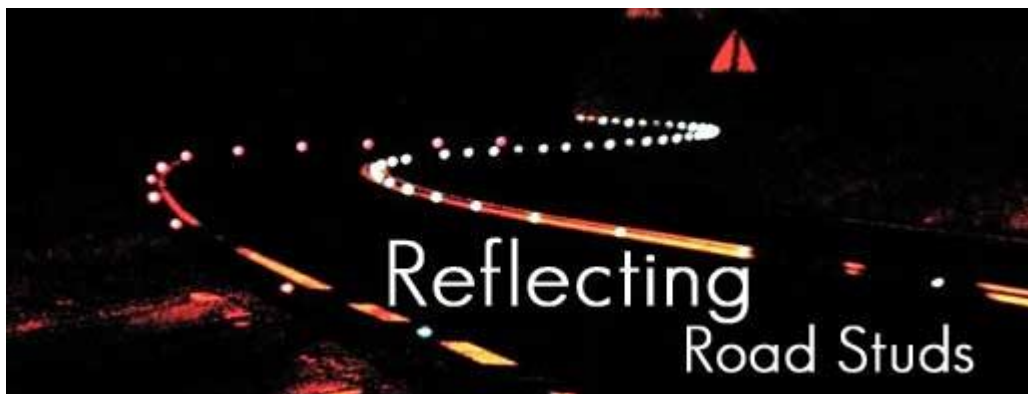


Figure 2-7 : Délinéateurs surélevés en condition de nuit.




Source : (LADWA, 2009)

2.5.2 Les marquages incrustés

2.5.2.1 Marquages incrustés sans bandes rugueuses

L'idée des marquages incrustés est de limiter l'impact du trafic (notamment des lames des déneigeuses) sur le marquage en l'incrutant dans la chaussée. Les dimensions de la rainure ne sont pas normalisées mais une étude très complète menée dans l'Oregon a testé plusieurs combinaisons de profondeur et de produits pour déterminer la meilleure façon d'incruster le marquage dans la chaussée. Cette étude est résumée dans le Tableau 2-7.

Tableau 2-7 : Profondeur de la rainure et épaisseur de produit en fonction du matériau utilisé (largeur fixe de 102 mm)

Matériau	Profondeur rainure (mm)	Épaisseur produit (mm)	Remarques	État d'une ligne blanche après 2 hivers
MMA	5,08	3,81	Efficace	
Bandes préfabriquées	3,18	3,18	Efficace mais rentable si utilisé dans des zones neigeuses	
Alkyde	6,35	4,83 5,59	Mieux que non incrusté mais pas rentable	

Source : (Lynde, 2006)

Une étude dans le Colorado a été faite pour déterminer l'efficacité de l'incrustation du marquage sur les thermoplastiques, les bandes préfabriquées et l'époxy. Après trois hivers, la rétro réflexion des bandes rugueuses varie entre 479,3 et 514,5 mcd/lx/m², celle des thermoplastiques varie entre 299 et 378 mcd/lx/m² pour la couleur blanche et de 154 à 209 mcd/lx/m² pour la couleur jaune. Les résultats pour l'époxy sont mitigés car certaines parties ont été arrachées, mais le marquage est tout de même plus durable que s'il n'avait pas été incrusté. Le chercheur conclut que le coût de cette solution est quasiment nul si le marquage incrusté est fait lors de la création de la chaussée mais que cette solution est difficilement applicable sur les routes âgées, car l'adhérence est mauvaise (Outcalt, 2004).

2.5.2.2 Marquages incrustés sur bandes rugueuses

Les bandes rugueuses sont un complément au marquage incrusté pour pallier au manque d'adhésion des matériaux sur la chaussée (béton ou asphalte). Son autre intérêt est de faire vibrer le véhicule lorsque celui-ci roule dessus, ce qui permet au conducteur d'être averti qu'il passe sur la ligne (sa géométrie est précisée sur la Figure 2-8). De plus, il apparaît que cette méthode permet de faire résister le marquage aux passages des déneigeuses en plus de diminuer la perte de rétro réflexion. Dans l'Indiana, une étude avant / après hiver a révélé qu'en cas de chaussée sèche

ou humide, la rétro réflexion d'un marquage sur bande rugueuse est supérieure à une ligne classique et que cette valeur reste supérieur au seuil imposé par la FHWA (Mitkey *et al.*, 2011).

Récemment, une étude sur des accidents avant / après pose du marquage sur bandes rugueuses confirme l'aspect sécuritaire de cette technologie puisque qu'une diminution d'accidents est observée dans toutes les catégories (alcool, drogue, morts, blessés, camions, voitures, vitesse, en courbe, sur ligne droite, ...) (Kubas, Kayabas, Vachal, & Berwick, 2013).

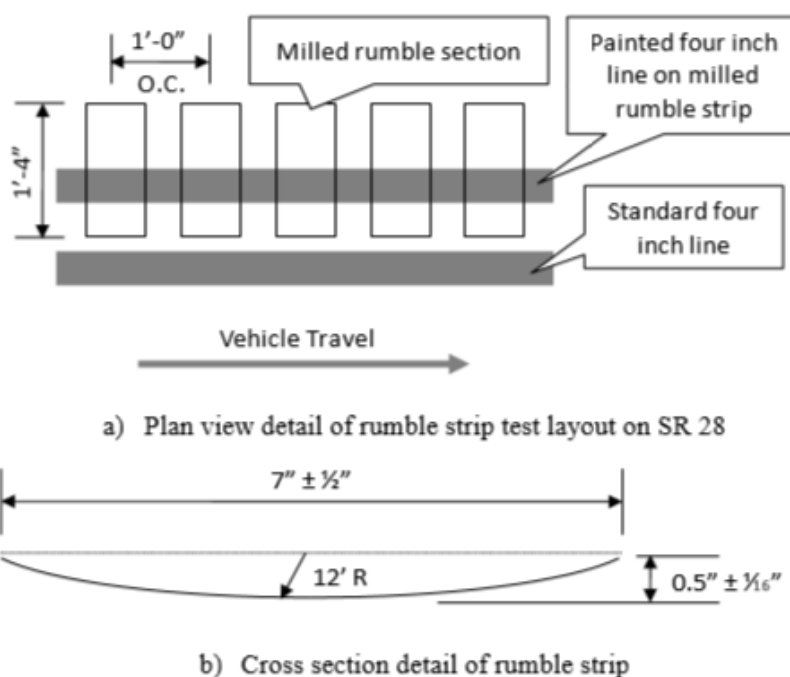


Figure 2-8 : Géométrie des bandes rugueuses dans l'Indiana.

Source : (Mitkey *et al.*, 2011)

Au Japon, une équipe de chercheurs a combiné l'incrustation du marquage et l'instauration de bandes rugueuses pour rendre leurs chaussées à la fois sécuritaires et durables vis-à-vis de l'entretien hivernal. L'allure de la bande est montrée en Figure 2-9. Cette méthode s'est montrée très efficace avec les thermoplastiques mais mauvaise sur les peintures à base d'eau, probablement à cause de leur viscosité trop faible qui fait que le produit va trop s'insérer dans les rugosités et donc diminuer l'épaisseur du marquage (Hirasawa, Kotera, Asano, & Aita, 2010).

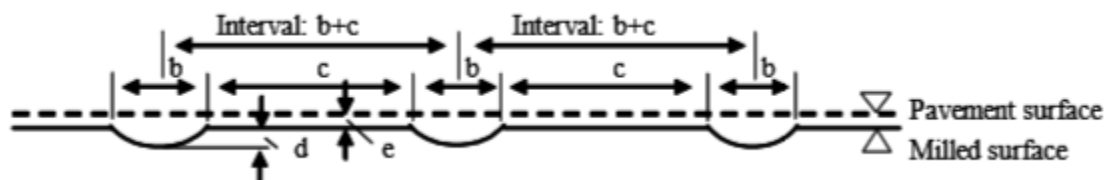


Figure 2-9 : Géométrie des bandes rugueuses incrustées
Source : (Hirasawa et al., 2010)

2.5.3 Les lames des déneigeuses

Une autre piste de recherche a été suivie concernant la limitation des dégâts causés par l'entretien hivernal, à savoir la modification du matériau des lames des déneigeuses.

Dans les années 1990 en Virginie, des lames en plaquettes de carbure étaient utilisées. Une étude a été effectuée pour évaluer la performance des déneigeuses en ajoutant des roues supportrices à la lame ou en remplaçant le matériau de la lame par du polyuréthane. Les critères de comparaison sont les suivants :

- Qualité de l'entretien ;
- État du marquage ;
- Maintenance de la lame ;

Le Tableau 2-8 résume l'efficacité des lames (Roosevelt & Cottrell Jr, 1997) :

Tableau 2-8 : Comparaisons des différents types de lames de déneigeuses

Type de lame	Qualité entretien hivernal		État marquage	Durée de vie de la lame	Prix de la lame
	Neige tassée	Neige non tassée			
carbure	+++	+++	+	++	+
carbure + roues supportrices	+	+++	++	++	++
polyuréthane	+	+++	+++	+	+++

Les lames en polyuréthane protègent bien mieux le marquage mais coûtent cher et sont très sensibles à la friction sur la chaussée. L'ajout de roues supportrices semble être un bon compromis mais son réglage doit être parfait pour que le grattage soit efficace et pour limiter la dégradation du marquage.

2.6 Conclusion de la revue de littérature

Les études semblent en accord pour dire que le marquage au sol a contribué à la diminution du nombre d'accidents de la route, même si Smadi précise qu'il est difficile de lier les données (2008). Sa géométrie et sa visibilité sont les éléments clés qui permettent de garantir la sécurité des usagers de la route.

Les microbilles de verre jouent un rôle essentiel pour assurer la visibilité de nuit de ces lignes, puisqu'elles assurent la rétro réflexion du marquage. Celles-ci doivent être enfoncées dans le matériau entre 40 et 60 % pour éviter que leur enfoncement ne soit trop important pour maintenir leur visibilité d'une part, et pour éviter qu'elles soient arrachées d'autre part.

Les peintures et l'époxy sont les deux matériaux les plus utilisés par le MTQ ; tandis que le polyurea, le méthacrylate de méthyle (MMA) et les bandes préfabriquées ont été testés. Ils disposent chacun de leurs avantages et de leurs inconvénients. La revue de littérature montre qu'en Amérique du Nord, le choix du matériau se fait généralement en fonction du DJMA des routes et de la présence ou non d'activité de déneigement, le but étant de trouver le meilleur coût en tenant compte de la durée de vie du marquage, soit le meilleur coût par unité de temps.

De nombreuses études ont été effectuées pour tenter de déterminer les facteurs influençant le plus la dégradation du marquage. Il apparaît clairement que les caractéristiques de la chaussée, et notamment l'âge de pose du marquage et le type de matériaux sont des facteurs clés.

Pourtant, la volonté des différents ministères et agences des transports à étudier l'impact du déneigement et la présence de solutions alternatives telles que les PRPM (ou SRPM), les marquages incrustés ou encore les bandes rugueuses tendent à prouver que l'usure des lignes par les lames des déneigeuses est un fait avéré.

La plupart des recherches menées au préalable reconnaissent toutefois des limites à leurs résultats concernant l'impact de l'entretien hivernal. En effet, la précision de leurs analyses est remise en cause par la taille de leurs bases de données, leur manque de détails ou encore leur manque de données pour certains facteurs.

Chapitre 3 **PRÉSENTATION DES DONNÉES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE**

Ce mémoire fait suite à un projet en collaboration avec le ministère des transports du Québec (MTQ) visant à établir différentes corrélations entre les caractéristiques du marquage, de la chaussée, les conditions météorologiques et l'entretien hivernal. Ce projet bénéficie de l'existence de plusieurs ensembles de données collectés par le MTQ :

- informations sur les chaussées ;
- informations sur les marquages ;
- informations sur l'entretien hivernal ;
- informations météorologiques.

Le choix de ces données repose sur la revue de littérature présentée au chapitre 2. Dans cette section, nous présentons les données et les variables utilisées pour l'étude faisant l'objet du chapitre 4. L'origine des données est décrite, ainsi que le choix des indicateurs retenus pour l'étude statistique de la perte de rétro réflexion et de durabilité.

3.1 Caractéristiques des routes

Avant de décrire les données fournies par le MTQ, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques des routes, notamment les types de routes, les types de ligne et le découpage des routes en portions.

3.1.1 Découpage spatial des routes

Dans les données du MTQ, les routes sont découpées en Routes, Tronçons, Sections et Sous-routes (RTSS). Cela correspond à une portion de route pouvant varier de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Le codage des RTSS est présenté sur la Figure 3-2.

En fait, tout point de la route peut être référencé par une mesure encore plus précise : le chainage, qui est une mesure (en mètres) de l'abscisse curviligne le long des RTSS (voir Figure 3-1). Puisque les différentes bases de données fournies par le ministère ne sont pas découpées selon les mêmes chaînages, l'étude a donc reposé sur le RTSS comme unité spatiale de référence.

L'entretien hivernal est, quant à lui, organisé selon des circuits regroupant plusieurs RTSS.

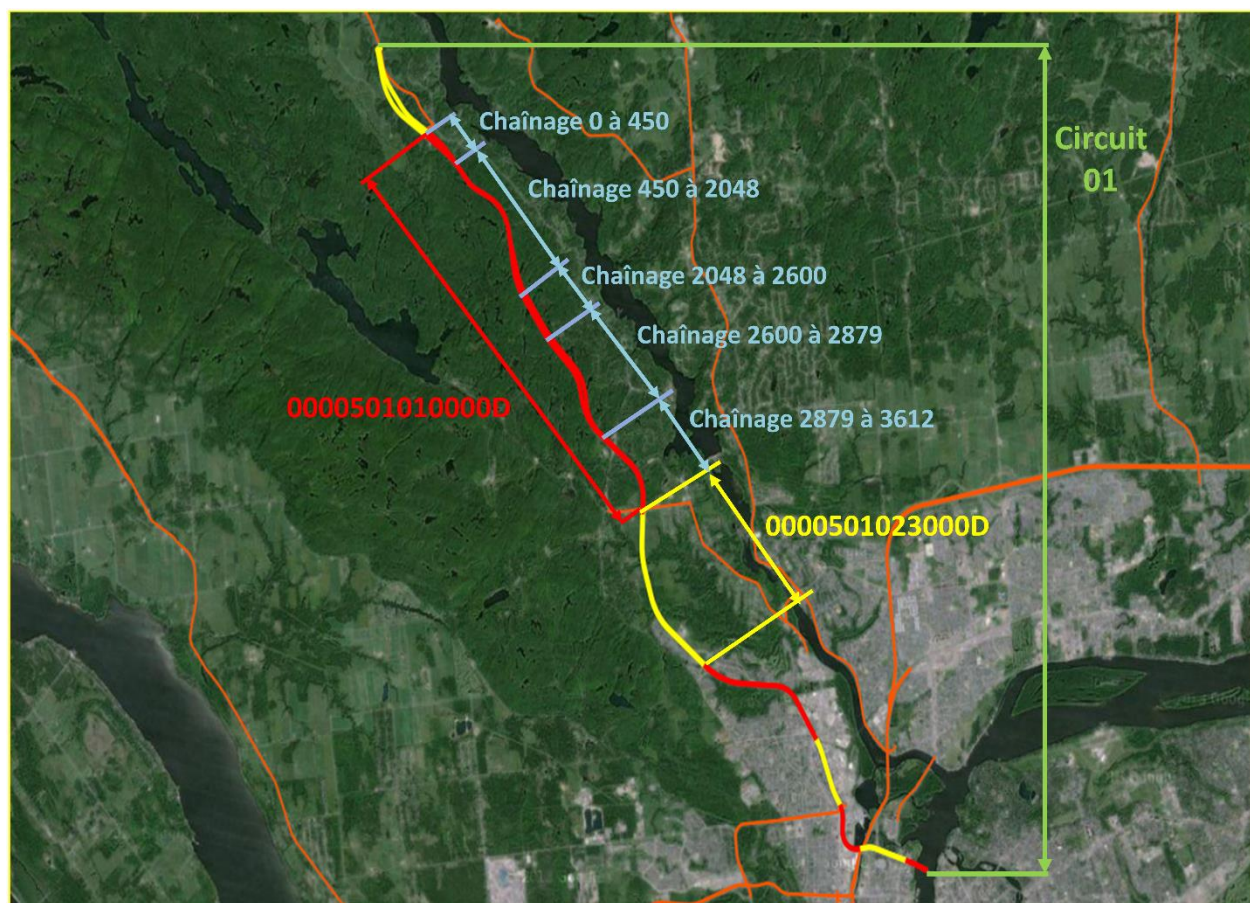


Figure 3-1 : Exemple présentant les concepts. Distinction entre le circuit (en vert), le RTSS (en jaune et en rouge) et le chaînage (en bleu). Le circuit 01 est composé de 8 RTSS (4 en rouge et 4 en jaune) et le RTSS 0000501010000D est composé de 5 chaînages.

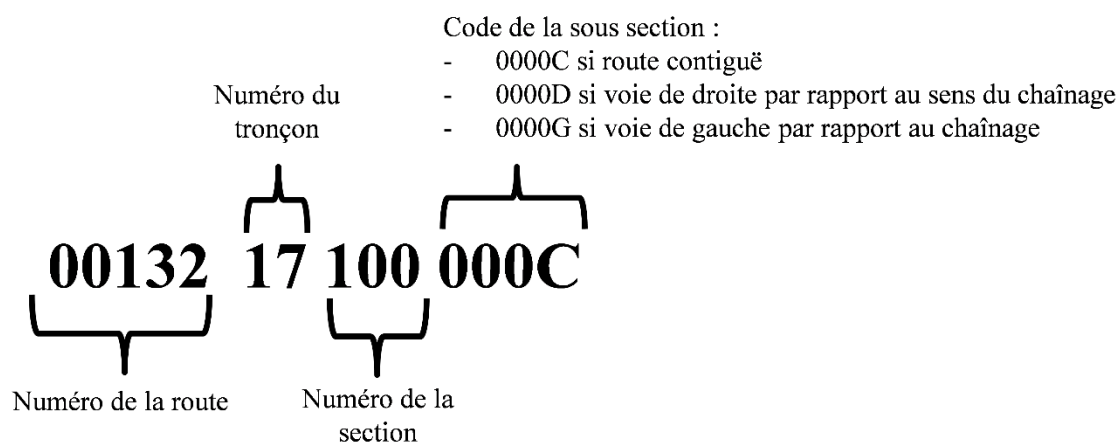


Figure 3-2 : Exemple de codage du RTSS
Source : (MTQ, 2002)

3.1.2 Types de lignes

Seules les lignes longitudinales sont étudiées dans ce projet. Elles permettent de délimiter les voies les unes par rapport aux autres. Chaque ligne porte un nom différent en fonction de son rôle. La (ou les) ligne(s) permettant de délimiter le sens de circulation est de couleur jaune tandis que les autres sont en blanc. Les routes disposant très souvent de deux sens de circulation, il est nécessaire d'imposer un sens arbitraire de référence pour définir le côté droit de la route et le côté gauche. Il a été imposé que la droite de la chaussée corresponde à ce qui serait à droite d'un observateur marchant sur la route dans le sens du chaînage croissant (défini lors de la codification de la route).

Il y a deux cas distincts à étudier : les routes à chaussées contiguës et celles à chaussées séparées. Il existe globalement trois types de lignes :

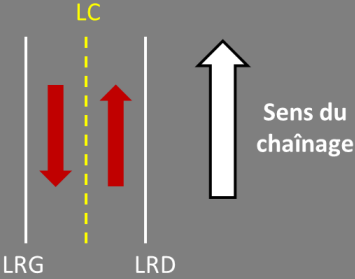
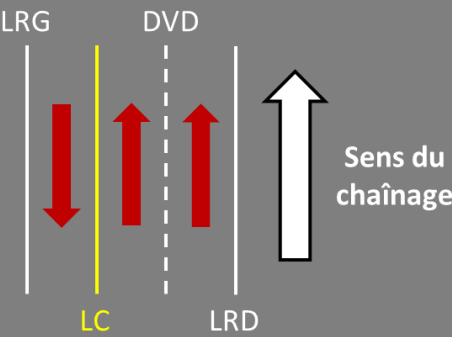
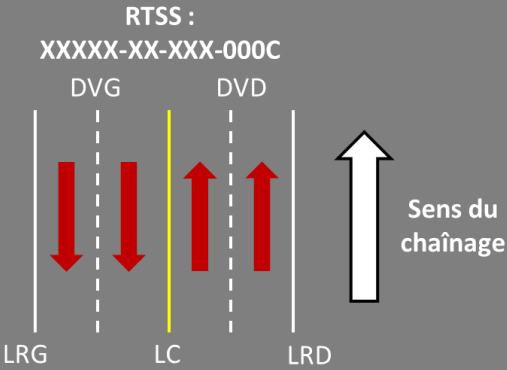
- les lignes de rives qui délimitent la chaussée et l'accotement : ligne de rive droite pour le bord droit de la chaussée, ligne de rive gauche pour le bord gauche ;
- la ligne centrale (aussi appelée ligne axiale ou ligne médiane) qui délimite les deux sens de circulation si la chaussée est contiguë ;
- les lignes de délimitation de voie si la chaussée dispose de plusieurs voies par sens de circulation.

Le Tableau 3-1 et le Tableau 3-2 illustrant ces différentes lignes sont présentées pour une meilleure compréhension dans les sous-parties suivantes.

3.1.2.1 Routes à chaussées contiguës

Ce sont les routes où les deux sens de circulation sont séparés uniquement par une ligne (habituellement double et de couleur jaune) au sol. Elles sont caractérisées par un RTSS se terminant par « C ». Le Tableau 3-1 donne le nom des lignes en fonction du nombre de voies de la route.

Tableau 3-1 : Nom des différentes lignes dans le cas de chaussées contiguës (les acronymes des figures sont définies dans le Tableau 3-3)

<p>1 + 1 voies contiguës</p>	<p>RTSS : XXXXX-XX-XXX-000C</p> 
<p>2 + 1 voies contiguës</p>	<p>RTSS : XXXXX-XX-XXX-000C</p> 
<p>2 + 2 voies contiguës</p>	<p>RTSS : XXXXX-XX-XXX-000C</p> 

3.1.2.2 Routes à chaussées séparées

Il s'agit des routes où les deux sens de circulation sont séparés physiquement (par un espace ou un îlot par exemple). Dans ce cas, il y a un RTSS par sens de circulation :

- Le côté droit est codé par un RTSS se terminant par « D » (exemple : 00020-04-190-000D),
- Le côté gauche est codé par un RTSS se terminant par « G » (exemple : 00020-04-190-000G).

Le Tableau 3-2 décrit le nom des lignes en fonction de la géométrie de la route et du RTSS.

Tableau 3-2 : Nom des différentes lignes dans le cas de chaussées séparées (les acronymes des figures sont définies dans le Tableau 3-3)

2 + 2 voies séparées	<div style="text-align: center;"> <p>RTSS : XXXXX-XX-XXX-000G RTSS : XXXXX-XX-XXX-000D</p> <p>DV DV</p> <p>LRG LRD LRG LRD</p> <p>Sens du chaînage</p> </div>
3 + 3 voies séparées	<div style="text-align: center;"> <p>RTSS : XXXXX-XX-XXX-000G RTSS : XXXXX-XX-XXX-000D</p> <p>LRG DVD LRG DVD</p> <p>DVG LRD DVG LRD</p> <p>Sens du chaînage</p> </div>

Tableau 3-3 : Définition des acronymes des différentes lignes

Acronyme	LRG	LRD	LC	DVG	DVD	DV
Nom	Ligne de rive gauche	Ligne de rive droite	Ligne centrale	Délimitation de voie de gauche	Délimitation de voie de droite	Délimitation de voie

3.2 Tables fournissant les caractéristiques des tronçons de route

De nombreuses données sont récoltées par le MTQ tous les ans sur les routes québécoises à travers différentes bases de données. Celles-ci permettent d'évaluer l'état global du réseau supérieur à un instant donné. Trois tables ont été fournies par le ministère dans le but de caractériser au maximum les tronçons de routes :

- le Fichier Maître Réseau (FMR) datant du 12 mars 2013 (fin de l'entretien hivernal de l'hiver 2012-2013) qui contient les informations concernant la chaussée ;
- la Base Géographique Routière (BGR) qui permet d'avoir les coordonnées géographiques des RTSS ;
- le fichier V-155 qui permet dans ce projet de connaître l'exigence de déglacage des routes (catégorisation des RTSS déterminant l'état de la chaussée à maintenir lors de chutes de neige).

Le Tableau 3-4 mentionne les informations exploitées dans les différentes tables pour l'étude de l'usure des marquages.

Tableau 3-4 : Données utilisées pour le projet dans les tables FMR, BGR et V-155 par RTSS

Table	Variables	Valeurs	Rôle
FMR	RTSS_DEBUT	Voir Figure 3-2	RTSS
	AGE_REVTM	0 à 28 ans	Âge du revêtement de la chaussée
	DES_CLASF_FONCT	10 – Autoroute 20 – Nationale 30 – Régionale 40 – Collectrice 53 – Locale 3	Classe fonctionnelle de la route
	DES_TYPE_REVTM	Rigide Souple Mixte	Type du revêtement
	DES_COD_MIL	Rural Sub-Urbain Urbain	Milieu dans lequel est implanté le RTSS
	VAL_DJMA	250 à 103500 voitures / jour	Débit Journalier Moyen Annuel du RTSS
	VAL_POURC_CAMNS	Environ 0 à 33 %	Pourcentage de camions circulant sur le RTSS
	VAL_LIMT_VITSS	50, 70, 80, 90 ou 100 km/h	Vitesse limite sur le RTSS
BGR	RTSS	Voir Figure 3-2	RTSS
	Geometry_XLO	Environ 83000 à 1700000 m	Coordonnées en conique lambert du rectangle dans lequel est inscrit le RTSS
	Geometry_XHI		
	Geometry_YLO	Environ 114000 à 1200000 m	
	Geometry_YHI		
V-155	RTSS_DEBUT	Voir Figure 3-2	RTSS
	exigence_deglacage	1A, 1B, 2A, 2B ou 3	Exigence de déneigement sur le RTSS (1 = chaussée dégagée, 2 = chaussées partiellement dégagée, 3 = chaussée sur fond de neige durcie)

3.3 Durabilité

La durabilité est une évaluation visuelle de l'état du marquage. Elle est relevée sur tous les types de lignes pour tout le réseau depuis 2004 (depuis 2011 pour les surlargeurs). Le contrôle se fait au début du RTSS, au niveau des entrées et sorties, à chaque fois qu'un changement de classe est observé et à tous les 3 km environ. Ces relevés sont souvent faits vers la fin mars et le début avril, après deux bonnes pluies ayant nettoyé la chaussée, par des employés du MTQ (*Tremblay, 2004*).

La durabilité se découpe en 5 classes, présentées dans le Tableau 1-1 en début de rapport. Il est possible de se rendre compte de l'allure des lignes dépendamment de leur classe à travers la Figure 3-3.



Figure 3-3 : État visuel du marquage en fonction de sa classe.

Source : (Tremblay, 2004)

Afin de déterminer les causes de la détérioration du marquage et l'impact particulier de l'entretien hivernal, le MTQ a fait des mesures de durabilité mensuelles entre janvier et avril 2013. Cela permet de suivre de façon plus fine la variation de la durabilité (voir Figure 3-4). Les informations utiles à l'étude fournies par la table de durabilité sont présentées dans le Tableau 3-5.

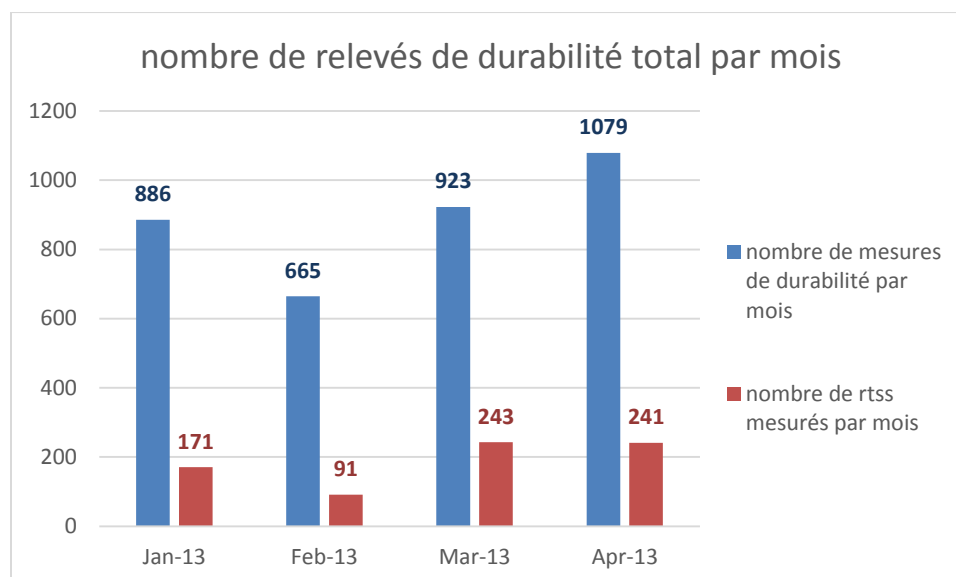


Figure 3-4 : Nombre de relevés de durabilité par mois (pour l'étude de l'impact de l'entretien hivernal)

Tableau 3-5 : Données utilisées dans la table de durabilité fournie par le MTQ

Nom	Valeurs	Rôle
No_Circuit_DSO	XXXXXX ⁴	Numéro du circuit
RTSS_DEBUT	Voir Figure 3-2	RTSS
Peinture_RG	Eau, Époxy, Alkyde ou autre	Type de peinture sur la rive gauche
Peinture_CL		Type de peinture sur la ligne centrale
Peinture_RD		Type de peinture sur la rive droite
Etat_RG	Classe 1, 2, 3, 4 ou 5	Classe de durabilité de la rive gauche
Etat_CL		Classe de durabilité de la ligne centrale
Etat_RD		Classe de durabilité de la rive droite
Date_Releve	Date au format Jour-Mois-Année	Jour où la mesure de durabilité a été faite

3.4 Rétroreflexion

Le MTQ utilise principalement un rétroreflectomètre mobile de marque Ecodyn pour faire ses mesures de rétroreflexion sur le territoire (une photographie de cet instrument est disponible en Figure 3-5, à gauche). Cet instrument est capable de prendre des mesures jusqu'à 100 km/h, ce qui permet de faire les relevés en continu et sans impact sur la circulation. De plus, l'Ecodyn a une résolution spatiale très fine puisqu'il peut prendre de nombreuses mesures sur une longueur de 50 m (Boily & Tremblay, 2014).

⁴ Dans ce mémoire, les numéros de circuit, de routes, de RTSS et les noms des centres de service ont été masqués à des fins de confidentialité.

Dépendamment de l'état du marquage, la rétroréflexion peut varier de entre 0 et plus de 1000 mcd/lx/m². La photo à droite de la Figure 3-5 illustre les différents seuils de rétroréflexion.



Figure 3-5 : Rétroreflectomètre Ecodyn du MTQ (à gauche) et visibilité du marquage la nuit en fonction de la rétroréflexion (à droite).

Source : (Boily & Tremblay, 2014)

Des mesures de rétroréflexion se font systématiquement tous les ans sur une partie du réseau, et de plus, dans le cadre de ce projet, le MTQ a exceptionnellement pris une mesure avant l'hiver 2012-2013 et une après pour les circuits de l'étude afin d'avoir la variation de rétroréflexion pendant l'hiver (voir Figure 3-6).

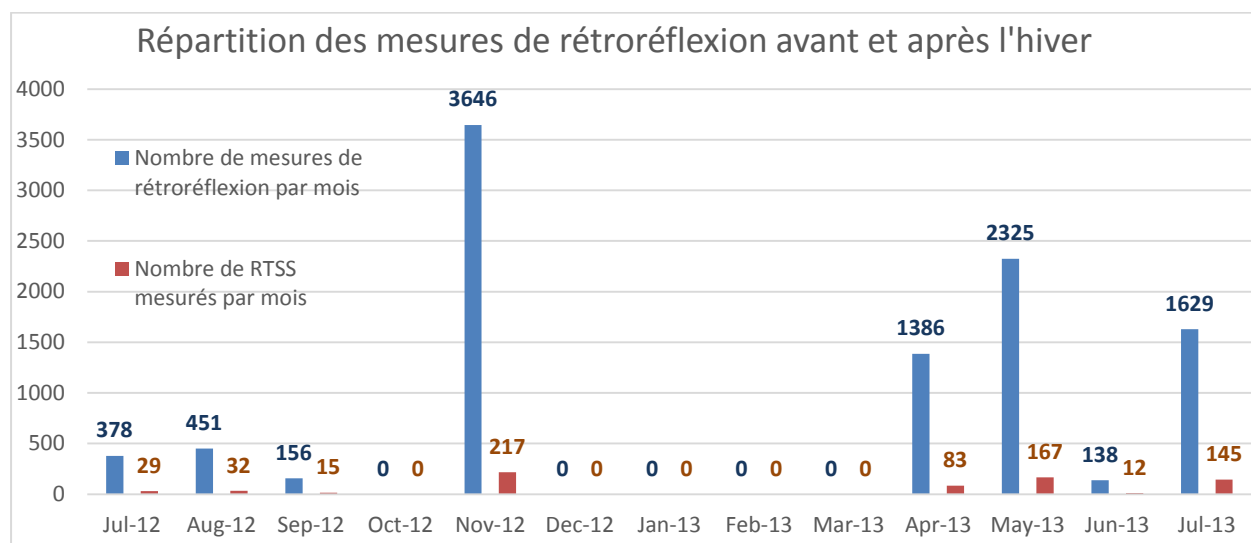


Figure 3-6 : Répartition des mesures avant et après l'hiver pour les années 2012-2013

Les informations du rétroreflectomètre sont directement enregistrées dans l'ordinateur embarqué. Le Tableau 3-6 précise les valeurs retenues pour la présente étude.

Tableau 3-6 : Données utilisées dans la table de rétro réflexion fournie par le MTQ

Nom	Valeurs	Rôle
No_Circuit_DSO	XXXXXX	Numéro du circuit
RTSS_DEBUT	Voir Figure 3-2	RTSS
NOM_FICHR	Code généré automatiquement par l'Ecodyn, composé de 13 caractères	Le 4 ^{ème} caractère fournit le type de ligne : C (centre), D (délimitation de voie de droite), G (délimitation de voie de gauche), R (rive) ou S (centre) Le 5 ^{ème} caractère fournit la couleur de la ligne : J (jaune) ou B (blanc)
DATE_CONTRL	Date au format Jour-Mois-Année-Heure	Jour où la mesure de durabilité a été faite
VAL_CHANG_DEBUT	De 0 à 22000 environ	Valeur de chaînage (en mètres)
VAL_CHANG_FIN	De 0 à 22000 environ	Valeur de chaînage (en mètres)
VAL_RETRO_MAX	De 0 à 850 environ	Plus haute valeur de rétro réflexion mesurée entre VAL_CHANG_DEBUT et VAL_CHANG_FIN
TYPE_SEG	2 ou 3	Longueur d'agrégation des mesures : - 2 : segments de 500 m - 3 : segments de 1000 m

3.5 Entretien hivernal

3.5.1 Circuits utilisés dans l'étude

L'entretien hivernal étant réalisé majoritairement par plusieurs entreprises privées, il est très difficile d'obtenir facilement des données concernant le passage des déneigeuses ou encore la quantité de matériau utilisée pour l'épandage (sel, abrasifs, etc.). Dans le cadre de cette étude, le MTQ a choisi 31 circuits pour lesquels il a été demandé aux chauffeurs des déneigeuses d'enregistrer ces informations.

Ces circuits ont été sélectionnés dans plusieurs directions territoriales du Québec afin d'avoir une couverture spatiale élargie dans l'étude. L'échantillon de routes comprend plusieurs types de routes : à chaussées séparées ou contiguës ; à 1, 2 ou 3 voies par sens de circulation. Il est possible de voir les différentes géométries de routes en annexe B.

3.5.2 Collecte de données

Durant l'hiver 2012-2013, afin de recueillir des informations pertinentes concernant l'entretien hivernal, les employés du MTQ et des différentes entreprises mandatées par le MTQ pour l'entretien hivernal ont eu pour mission de remplir un formulaire de manière hebdomadaire. Cette fiche est sous forme d'un fichier Excel, telle que présentée à la Figure 3-7 ci-dessous.

Numéro de circuit: XXXXX circuit route XXX (aller-retour) 2 voies contiguës					
Semaine du:		2013-03-04	2013-03-11	2013-03-18	2013-03-25
Données tirées du ROH					
Précipitations (approximatif)	Neige (cm)	5	0		
	Eau (mm)	0	30		
	Autres :	0	0		
Matériaux	Abrasif (Tonnes appliquées)	36,09	18,60		
	sel (Tonnes appliquées)	5,63	3,28		
	Autre :	0,00	0,00		
Interventions	Nombre de fois les grattes au sol Ligne de centre	16	10		
	Nombre de fois les grattes au sol lignes de rive gauche	8	5		
	Nombre de fois les grattes au sol lignes de rive droite	8	5		
Entretien	niveau 2				
DJMH	440 à 2300 v.j.				
Commentaires	Lame mobile au carbure simple en avant. Aile de côté au carbure simple.				

Figure 3-7 : Fiche d'entretien hivernal de XXXXX (circuit XXXXXX) pour le début du mois de Mars 2013

Cette fiche fournit les données suivantes (par circuit et par semaine) :

- la quantité de pluie (en mm) et de neige (en cm) tombées ;
- la quantité (en t) de sel, d'abrasif, de criblure de pierre et de calcium liquide utilisés ;
- le nombre de fois où les déneigeuses sont passés sur la route avec la lame sur la chaussée ;
- le niveau d'exigence de déneigement ;
- le débit journalier moyen annuel (DJMA) ;
- des commentaires divers provenant de l'employé de collecte.

3.5.3 Table circuit origine

Une table appelée « Circuit_Origine » a été créée afin de faire le lien entre les noms des circuits utilisés par les équipes d'entretien hivernal, les numéros de circuits présents dans les bases de données du MTQ et leurs RTSS associés. Celle-ci est essentielle puisque toutes les autres données fournies pour le projet ont pour unité spatiale d'analyse le RTSS. La raison du choix de cette unité de référence est expliquée en détail dans le chapitre 4.

3.6 Données météorologiques

Lors de la collecte de l'entretien hivernal, les employés ont fait l'effort de fournir des informations concernant les quantités d'eau et de neige tombées à la semaine. Cependant, les sources d'informations sont variables et les données sujettes à caution. De plus, aucune information concernant les températures n'est fournie. Pour y remédier, les données disponibles gratuitement sur le site internet d'Environnement Canada (www.environnement-canada.ca) ont été téléchargées pour les stations les plus proches des RTSS du projet afin de pouvoir étudier l'impact des conditions météorologiques sur les marquages. Le site fournit un fichier base de données par année et par station météorologique. Étant donné que la collecte s'étend sur les années 2012 et 2013 et qu'il y a 19 stations proches des tronçons étudiés, 38 fichiers ont été téléchargés pour le projet.

Le MTQ dispose d'un certain nombre de stations météorologiques (SMR) qui fournissent des informations sur la route comme la température de la chaussée ou le point de rosée. Ces données sont plus pertinentes que celles d'Environnement Canada (EC) qui ne fournit pas ces informations. Les SMR utilisées sont au nombre de 4 et couvrent la période du 1^{er} Mai 2012 au 1^{er} Août 2013, ce qui correspond à la période couverte par les données de durabilité et de rétroreflexion.

Le Tableau 3-7 précise les données météorologiques utilisées dans le projet.

Tableau 3-7 : Données météorologiques utilisées dans le projet

Table	Variable	Rôle
Environnement Canada (EC)	Date/Heure	Date de prise de mesure (une par jour)
	Temp max.moy.(°C)	Température de l'air maximale de la journée
	Temp min.moy.(°C)	Température de l'air minimale de la journée
	Temp moy.(°C)	Température de l'air moyenne de la journée
	Pluie tot.(mm)	Quantité de pluie tombée dans la journée
	Neige tot.(cm)	Quantité de neige tombée dans la journée
	Precip. tot.(mm)	Quantité de neige et de pluie tombées dans la journée
SMR	Date-heure	Date de prise de mesure (une par tranche de 10 min)
	Ta	Température de l'air
	Ts	Température à la surface de la chaussée
	Td	Point de rosée

Chapitre 4 NETTOYAGE ET AGRÉGATION DES DONNÉES

Les données utilisées sont issues de plusieurs bases de données. Il faut donc transformer et agréger les variables utiles pour mettre en relation les facteurs potentiels avec les mesures de qualité du marquage. Ensuite, le travail statistique à l'aide de logiciels devient réalisable.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer comment a été fait le passage d'un ensemble de tables non liées à une base de données intégrée afin de pouvoir faire l'analyse de la dégradation du marquage en fonction des différents facteurs explicatifs. La plupart des informations fournies proviennent de sources différentes au sein du MTQ. Elles nécessitent donc une mise en forme rigoureuse permettant de lier les variables dans le but de créer une base de données relationnelle : il s'agit d'une contribution de ce projet. Cette section explique minutieusement les méthodes utilisées et les transformations requises sur les tables introduites dans le chapitre 3 et les limites des jeux de données mis à disposition dans le but de générer une base de données complète en format Microsoft Access.

4.1 Choix de l'unité spatiale d'analyse

Le but de l'étude est de déterminer des facteurs expliquant la dégradation des marquages au sol. Pour cela, il faut pouvoir exprimer la perte de rétro réflexion et de durabilité en fonction des variables explicatives. Ces données sont spécifiques à des sites (en particulier les circuits d'entretien) qu'il faut pouvoir les lier spatialement entre eux.

Seulement, les différents jeux de données présentés dans le chapitre 3 ne possèdent pas les mêmes références spatiales (voir Tableau 4-1), il faut donc choisir une unité spatiale d'analyse commune à toutes les tables. Le chaînage étant une unité spatiale encore plus précise, il pourrait paraître logique de s'en servir comme référence spatiale, mais il s'avère que le découpage des RTSS en chaînage pour les mesures de rétro réflexion et durabilité est fait de façon aléatoire à chaque prise de mesure, ce qui ne le rend pas exploitable dans le cadre de cette étude. C'est pourquoi le choix s'est porté sur le RTSS.

Tableau 4-1 : Référence spatiale des différents jeux de données du projet

Jeu de données	Références spatiales
Entretien hivernal	Numéro de circuit
Durabilité	RTSS et chaînage
Rétroreflexion	
FMR	
V-155	
BGR	RTSS

4.2 Caractéristiques des routes à l'échelle du RTSS

Le Tableau 4-2 contient la liste des tables fournies par le ministère qui comportent des informations caractérisant les tronçons de route. On rappelle que leurs définitions sont dans le Tableau 3-4 dans la partie 3.2.

Tableau 4-2 : Caractéristiques des tronçons utilisés dans l'étude (les attributs en italique sont à agréger à l'échelle du RTSS)

Tables	V155	FMR	BGR	durabilite
Variables	Exigence_deglacage	<i>Age_revtm</i>	<i>Geometry_XLO</i>	<i>Type_peinture</i>
		<i>Des_Classe_fonct</i>	<i>Geometry_YLO</i>	
		<i>Des_Type_revtm</i>	<i>Geometry_XHI</i>	
		<i>Des_cod_mil</i>	<i>Geometry_YHI</i>	
		<i>Val_djma</i>		
		<i>Val_pourc_camns</i>		
		<i>Val_limt_vitss</i>		

La plupart des attributs des tronçons sont disponibles à l'échelle du chaînage (en italique dans le Tableau 4-2), ce qui se traduit par plusieurs valeurs, potentiellement différentes, pour un RTSS donné. Il faut donc trouver une méthode pour caractériser de façon globale tout le RTSS. Pour les données de type catégorielles (il s'agit de toutes les données du Tableau 4-2, sauf « val_djma », « val_pourc_camns » et « val_limt_vitss » qui sont continues), la solution choisie est de prendre la valeur la plus fréquente parmi tous les chaînages d'un même RTSS, grâce à une fonction écrite avec le langage de programmation Python. Le schéma ci-dessous illustre la méthode utilisée. Pour ce qui est des données continues, la moyenne a été calculée sur le RTSS.

Bien que le DJMA et l'exigence de déglacage étaient disponibles dans les fiches d'entretien hivernal (voir Figure 4-1), les données du FMR sont utilisées car plus complètes.

RTSS	Ch_debut	Ch_fin	Exigence_deglacage
	0	729	1A
	729	1529	1A
	1529	3017	1A
	3017	3356	1B
	3356	4125	1B

Ocurrence(1A) = 3

Ocurrence(1B) = 2

}

Exigence_deglacage

(1A)

= 1A

Figure 4-1 : Exemple d'utilisation de la méthode d'agrégation de l'exigence de déglacage d'un RTSS⁵

4.3 Données de durabilité

La table de durabilité fournie par le MTQ contient deux types d'indicateurs : les variables de type de peinture par ligne (« Peinture_RG », « Peinture_CL » et « Peinture_RD ») et les variables de classe de durabilité (« Etat_RG », « Etat_CL » et « Etat_RD »). Les types de peintures ont été traités comme les variables caractérisant la chaussée en section 4.2 car elles sont de type catégoriel (pour chaque RTSS, la valeur la plus fréquente a été choisie), tandis que les variables d'état de durabilité des lignes sont décrites dans la suite de cette partie.

Comme le montre le Tableau 3-5, les données de durabilité sont fournies par chaînage et par date de relevé. L'unité spatiale de référence étant le RTSS, il peut y avoir plusieurs valeurs de durabilité pour un RTSS à une date donnée. Un premier traitement est donc nécessaire pour agréger les données par tronçon.

De plus, un enregistrement contient les valeurs de durabilité pour tous les types de lignes (RG, CL et RD ; de même pour SG et SD, mais ces variables ne sont pas utilisées dans cette étude). Il serait judicieux d'avoir une variable fournissant le type de la ligne (RG, CL ou RD) et une variable donnant la valeur de durabilité pour cette ligne. Cela permettrait d'avoir une seule variable d'état de durabilité par enregistrement et d'ajouter le type de ligne comme variable indépendante.

Enfin, le MTQ a fourni les dates de repeinte de tous les tronçons de route du projet, ce qui a permis de générer une nouvelle mesure pour augmenter le nombre de mesures de durabilité, en supposant une mesure de durabilité maximale à la date de repeinte.

⁵Le lecteur excusera le masquage de certaines informations des tableaux et figures à des fins de confidentialité.

4.3.1 Agrégation des données de durabilité par RTSS

La première étape consiste à agréger les données de la table de durabilité pour se ramener à l'échelle spatiale choisie. L'idée pour ces valeurs est de prendre la moyenne de durabilité sur un RTSS, mais celles-ci sont fournies sous forme catégorielle (voir Tableau 3-5). La méthode utilisée pour obtenir la valeur médiane de durabilité par RTSS est de remplacer dans un premier temps chaque classe de durabilité par une valeur numérique (voir Tableau 4-3). Cela est possible grâce à la fonction REPLACE du logiciel Microsoft Access.

Tableau 4-3 : Valeur moyenne de durabilité par classe

Classe de durabilité	Intervalle de la classe (%)	Moyenne de l'intervalle
1	96 à 100	98
2	75 à 95	85
3	50 à 75	62,5
4	15 à 50	32,5
5	0 à 15	7,5

Ensuite, il ne reste plus qu'à déterminer la durabilité du RTSS en faisant la médiane des durabilités par chaînage. Dans le Tableau 4-4, la « Durabilite_med_RG » est la médiane des « Etat_RG » pour un RTSS donné à une date de relevé donnée (idem pour les variables « Durabilite_med_CL » et Durabilite_med_RG »)

Tableau 4-4 : Passage d'une classe de durabilité d'une ligne de rive gauche par chaînage à une valeur de durabilité par RTSS

RTSS	Ch_debut	Ch_fin	Classe_RG	Etat_RG	Durabilite_med_RG
XXX	0	525	1	98	85
XXX	525	1536	2	85	
XXX	1536	2412	3	62,5	
XXX	2412	3895	1	98	
XXX	3895	4128	2	85	

4.3.2 Ajout de la variable indépendante « type_ligne »

Pour ajouter le type de ligne en variable indépendante, la solution choisie est de remplacer les colonnes « durabilite_med_RG », « durabilite_med_CL » et « durabilite_med_RD », induites de l'agrégation de durabilité par RTSS, par une colonne « type_ligne » et une autre « durabilite ». Cette conversion du format des données est effectuée par un programme écrit dans le langage Python. Les deux tableaux ci-dessous permettent de voir la transformation de la base de données. La table passe d'un seul relevé par date et par tronçon (Tableau 4-5) à un relevé par date, par tronçon et par type de ligne (Tableau 4-6).

Tableau 4-5 : Exemple de table de durabilité avant le découpage par type de ligne

RTSS	date	durabilite_ med_RG	durabilite_ med_CL	durabilite_ med_RD
XXX	27/02/2013	85,7	62	85,7
XXX	28/03/2013	85,7	62	85,7
XXX	30/04/2013	62	47	62

Tableau 4-6 : Exemple de table de durabilité après le découpage par type de ligne

RTSS	date	type_ligne	durabilite
XXX	27/02/2013	lrg	85,7
XXX	27/02/2013	lc	62
XXX	27/02/2013	lrd	85,7
XXX	28/03/2013	lrg	85,7
XXX	28/03/2013	lc	62
XXX	28/03/2013	lrd	85,7
XXX	30/04/2013	lrg	62
XXX	30/04/2013	lc	47
XXX	30/04/2013	lrd	62

4.3.3 Ajout des dates de repeinte

4.3.3.1 Rôle des dates de repeinte

Le MTQ nous a informé que tous les circuits de l'entretien hivernal ont été repeints dans le but de commencer les mesures sur un marquage neuf. Après le rafraîchissement d'un marquage, la durabilité de celui-ci est maximale, c'est-à-dire à 100 %. En ayant la date de la repeinte, il est alors possible d'ajouter une mesure non-observée de durabilité d'une valeur de 100 à cette date. Cela permet d'augmenter la taille de la base de données, ce qui est souhaitable pour les études statistiques.

4.3.3.2 Méthode utilisée pour insérer les dates de repeinte

La première étape a consisté à recenser dans un fichier Microsoft Excel les dates de repeinte par RTSS en compilant les informations fournies par les différents responsables de centre de service au sein du MTQ. Une fois toutes les dates enregistrées, il a fallu créer une jointure dans le logiciel de traitement de base de données Access via une requête SQL pour relier la table de durabilité à la table de repeinte récemment ajoutée. La table de durabilité dispose maintenant

d'un nouveau relevé de durabilité correspondant à une valeur de 100 le jour de la repeinte du marquage.

4.4 Données de rétroréflexion

La base de données qui a été fournie est directement extraite du rétroréflexomètre mobile du MTQ. Elle a nécessité un travail conséquent de compréhension et de mise en forme pour pouvoir l'utiliser. La première difficulté est que le type de ligne mesuré est codé via le « NOM_FICHR » et le RTSS. Il a donc fallu établir un algorithme pour déterminer le marquage mesuré. De plus, les mesures étant relevées par chaînage, une agrégation est aussi nécessaire pour se ramener au RTSS, l'unité spatiale du projet.

4.4.1 Détermination des types de lignes

Contrairement à la durabilité, les enregistrements de rétroréflexion sont présentés une ligne à la fois. En effet, chaque enregistrement du rétroréflexomètre du MTQ est caractérisé, entre autres, par un RTSS (« RTSS_DEBUT_Orig » dans la base de données, dérivé des coordonnées géographiques lors de la mesure par l'instrument), un nom de fichier (« NOM_FICHR »), une valeur de chaînage de début et de fin (« val_chang_debut » et « val_chang_fin »). Ce sont ces variables qui permettent de déterminer de quelle ligne il s'agit. Ces paramètres sont précisés dans le Tableau 4-7 ci-dessous :

Tableau 4-7 : Explication des différents caractères permettant de déterminer le type de ligne pour les données de rétroréflexion

NOM_FICHR		RTSS_DEBUT_Orig : Dernier caractère : type_voie	val_chang_ debut	Val_chan g_fin
4 ^{ème} caractère : type de ligne	5 ^{ème} caractère : couleur de la ligne			
C : centrale	B : blanc	C : contiguë	Nombre indiquant en mètres la distance entre la mesure et le début du RTSS	Nombre indiquant en mètres la distance entre la mesure et le début du RTSS
D : délimitation de voie de droite		D : séparée, partie droite dans le sens du chaînage		
G : délimitation de voie de gauche		G : séparée, partie gauche dans le sens du chaînage		
R : rive	J : jaune			
S : centrale (erreur de frappe de l'opérateur)				

Avec ces informations, il faut, pour tous les types de route, déterminer 3 types de lignes : rg, cl et rd (respectivement rive gauche, ligne centrale et rive droite), comme pour la durabilité (avec

« Etat_RG », « Etat_CL » et « Etat_RD »). L'algorithme mis en place sous Microsoft Access pour déduire le type de ligne mesuré depuis les données présentées dans le tableau précédent est présenté dans la Figure 4-2. De plus, des figures illustrant la correspondance entre le codage et le type de ligne sont disponibles dans l'annexe B.

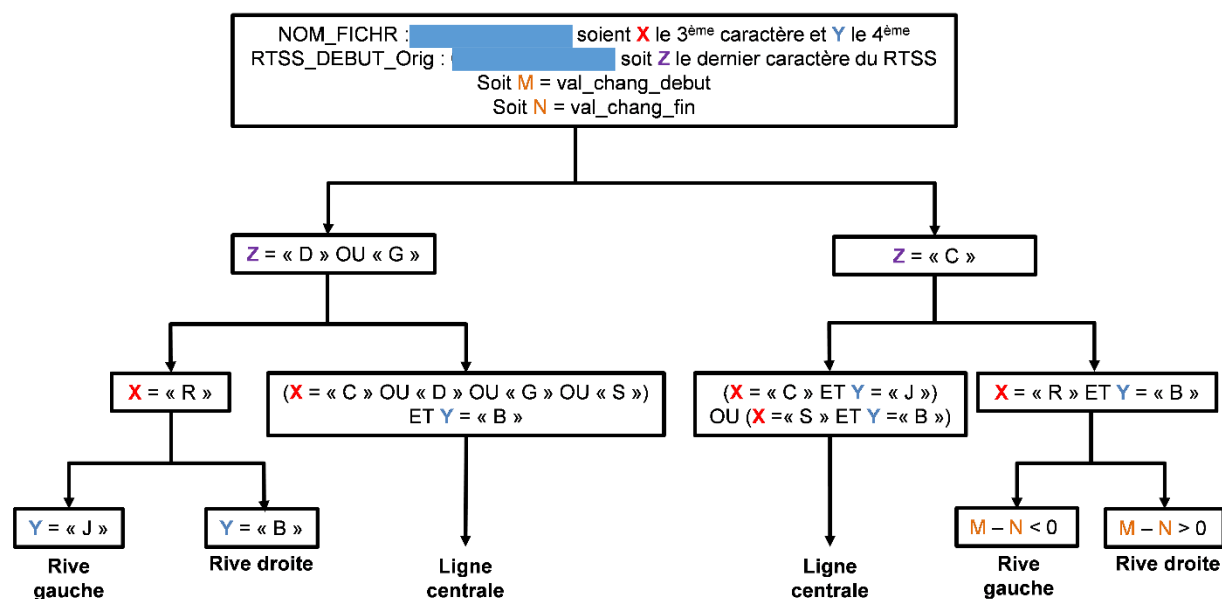


Figure 4-2 : Algorithme de détermination de la ligne en fonction du RTSS, du nom du fichier et des valeurs de chaînage

4.4.2 Agrégation des données de rétro réflexion

Tout comme pour la durabilité, il s'agit maintenant de convertir cette table à l'échelle spatiale choisie pour cette étude : le RTSS. Encore une fois, le découpage de cette table est disponible par chaînage. Le travail d'agrégation a donc été le même que pour la durabilité (se référer à la partie 4.3.1), sauf qu'il n'était pas nécessaire de transformer les classes en valeur numérique étant donné que le champ « VAL_RETRO_MAX » est déjà une valeur numérique. Au final, la nouvelle table dispose de la médiane par RTSS de toutes les valeurs de rétro réflexion par chaînage (voir Tableau 4-8).

Tableau 4-8 : Exemple de la table de rétro réflexion après le traitement

ref_circuit	no_circuit	rtss	date_contrl	ligne	couleur	Retro_med
XXX	XXX	XXX	2012-08-22	cl	blanc	375,50
XXX	XXX	XXX	2013-06-19	cl	blanc	146,34

4.4.3 Dates de repeintes

Contrairement à la durabilité, le fait de connaître les dates de repeinte du marquage ne nous a pas permis de générer un enregistrement fictif de rétro réflexion. Cela est dû au fait que les mesures de rétro réflexion sur un marquage neuf ou rénové sont trop volatiles. Il n'est donc pas possible d'associer une valeur seuil pour un marquage repeint. De plus, la rétro réflexion d'un marquage neuf dépend de la peinture utilisée et surtout de sa couleur, contrairement à la durabilité dont la valeur maximale sera de 100% indépendamment des autres caractéristiques du marquage.

4.5 Collecte de l'entretien hivernal 2012/2013

4.5.1 Recensement des données

Un important travail d'organisation des informations fournies par le ministère concernant l'entretien hivernal a été effectué pour créer une table normalisée exploitable. Chaque semaine durant l'hiver 2012/2013, nous avons reçu un formulaire par circuit tel que présenté en Figure 3-7 plus haut dans le rapport. Seulement, le format de ce fichier n'était pas le même en fonction du type de route. Cela a eu pour effet d'augmenter le nombre de paramètres répertoriés lors de la collecte de l'entretien hivernal.

Un tableur (au format Excel) a donc été mis à jour hebdomadairement grâce aux données présentées dans ces formulaires. Les données recensées sont les suivantes (on rappelle que les types de lignes sont dessinés dans les Tableau 3-1 et Tableau 3-2 pour une meilleure représentation visuelle). :

- ref_circuit : c'est le nom donné au circuit par le Centre de Service (CS) ;
- date : date du début de la semaine où les données ont été recensées ;
- neige : quantité de neige tombée durant la semaine, en cm ;
- eau : quantité d'eau tombée durant la semaine, en mm ;
- abrasif : quantité d'abrasif utilisé dans la semaine, en t ;

- sel : quantité de sel utilisé, en t ;
- criblure_de_pierre : quantité de criblure de pierre utilisée dans la semaine, en t ;
- calcium_liquide : quantité de calcium liquide utilisé dans la semaine, en t ;
- *DVG_S* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de délimitation de voie de gauche dans le cas d'une route à chaussées séparées ;
- *DVD_S* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de délimitation de voie de droite dans le cas d'une route à chaussées séparées ;
- *LRG_S* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de rive gauche dans le cas d'une route à chaussées séparées ;
- *LRD_S* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de rive droite dans le cas d'une route à chaussées séparées ;
- *LC_C* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne centrale dans le cas d'une route à chaussées contiguës ;
- *LRG_C* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de rive gauche dans le cas d'une route à chaussées contiguës ;
- *LRD_C* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de rive droite dans le cas d'une route à chaussées contiguës ;
- *DV_C* : nombre de passages de déneigeuse avec la gratte en contact avec le sol dans la semaine sur une ligne de délimitation de voie dans le cas d'une route à chaussées contiguës avec au moins deux voies par sens de circulation.

Il est important de noter que le grand nombre de champs recensant le nombre de passages des déneigeuses (en italique ci-dessus) est issu de la variété des types de ligne en fonction du type de chaussée (contiguë ou séparée). Il faut donc voir s'il est possible de créer des sous-catégories de lignes pour diminuer le nombre de paramètres.

4.5.2 Simplification des données

4.5.2.1 Données de circuits inexploitable

Sur les 31 circuits mandatés par le MTQ pour l'étude, seulement 23 disposent de données exploitables.

4.5.2.2 Variable autres_abrasifs

La table générée grâce à la collecte indique que la criblure de pierre et le calcium liquide sont peu utilisés. Ces deux variables risquent de ne pas être assez représentées pour expliquer la perte de qualité du marquage. La logique suivante a été utilisée pour remplacer ces deux champs par une variable binaire nommé « autres_abrasifs » :

Formule 4-1 : Détermination de la valeur de la variable « autres_abrasifs »

$$autres_abrasifs = \begin{cases} 1 & \text{si } (criblure_de_pierre > 0) \text{ OU } (calcium_liquide > 0) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cela permet de filtrer les circuits où ces deux types de matériaux ont été utilisés, ou encore de voir si leur utilisation (et non la quantité utilisée) est significative en terme de perte de qualité du marquage.

4.5.2.3 Agrégation des types de lignes en 3 catégories

Les mesures de durabilité sont relevées de façon distincte pour les trois types de ligne suivants (le suffixe du nom de la variable correspond au type de ligne) :

- RG pour rive gauche ;
- CL pour ligne centrale ;
- RD pour rive droite ;

Pour comparer les données de durabilité et de rétroréflexion à celles de l'entretien hivernal, deux problèmes sont constatés :

- Il y a deux types de lignes de rive gauche dans la collecte de données de l'entretien hivernale pour les chaussées séparées et contigües (« LRG_S » et « LRG_C ») et un seul pour la durabilité et la rétroréflexion. Le même problème se pose pour la rive droite.

- Il y a trois types de délimitation de voie dans les données de l'entretien hivernal (« DVG_S », « DVD_S » et « DV_C ») et pas d'équivalent dans la durabilité et la rétroréflexion.

Il a donc fallu faire des choix pour déterminer des sous-catégories de lignes universelles. Pour ce faire, tous les types de lignes dans l'entretien hivernal ont été agrégés de façon à garder uniquement trois catégories : LRG, LC, LRD. On rappelle que la durabilité des surlargeurs est fournie la table mais n'a pas été exploitées car les informations d'entretien hivernales ne sont pas fournies pour ces lignes.

L'affectation du nombre de passages de déneigeuses par types de ligne est rendue possible grâce au comportement similaire de certaines lignes vis-à-vis d'autres, dépendamment du type de route. Le Tableau 4-9 ci-dessous résume le regroupement des lignes en fonction du type de route. Lorsque plusieurs lignes correspondent, le choix a été de prendre celle qui a subi le plus de passages de déneigeuse, afin de prendre le cas le plus « défavorable ».

Tableau 4-9 : Affectations des mesures de l'entretien hivernal (nombre de passages de déneigeuses) aux différents types de lignes

Schéma type de route	Affectation choisie
<p>RTSS : XXXXX-XXXXX-000C</p> <p>LRG LRD</p> <p>2 fois 1 voie contiguës</p>	<p>Pas de difficulté :</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRG = LRG_C - LC = LC_C - LRD = LRD_D
<p>RTSS : XXXXX-XXXXX-000C</p> <p>LRG LC LRD</p> <p>2 fois 2 voies contiguës</p>	<p>On constate que le nombre de passage de - DVG, LC et DVD sont très proche :</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRG = LRG_C - LC = max(DV_C, LC) - LRD = LRD_C
<p>RTSS : XXXXX-XXXXX-000G</p> <p>LRG LRD</p> <p>2 fois 2 voies séparées</p>	<p>Pas de difficulté :</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRG = LRG_S - LC = DV_S - LRD = LRD_S
<p>RTSS : XXXXX-XXXXX-000G</p> <p>LRG LRD</p> <p>2 fois 3 voies séparées</p>	<p>On constate que les DVD_S et DVG_S sont comparables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRD = LRD_S - LC = max(DVD_S, DVG_S) - LRG = LRG_S
<p>LRG DV</p> <p>LRG LC LRD</p> <p>2 voies + 1 voie contiguës</p>	<p>On constate que les DV_C et LC_C sont proches :</p> <ul style="list-style-type: none"> - LRG = LRG_C - LC = max(DV_C, LC_C) - LRD = LRD_C

Une variable binaire a été mise en place dans la table de l'entretien hivernal : « `premiere_neige` ». Cette variable vaut 1 lorsque la déneigeuse est passée pour la première fois sur le circuit considéré et 0 sinon. Elle permet d'étudier l'impact du premier passage des déneigeuses qui semblerait important selon la littérature (Chapitre 2).

4.5.3 Ajout de la variable indépendante « `type_ligne` »

Pour les mêmes raisons que celles mentionnées dans la partie 4.3.2, le format de la table est modifié pour ajouter la variable « `type_ligne` » (de valeurs `lrg`, `lc` et `lrd`). Cette modification a été effectuée à l'aide d'un programme écrit dans le langage de programmation Python, le découpage de la base de données est précisé dans les Tableau 4-10 et Tableau 4-11 (certaines variables ne sont pas présentées dans les tableau par souci de clarté).

Tableau 4-10 : Exemple de la base de données « `entretien_hivernal` » avant découpage

<code>ref_circuit</code>	<code>date</code>	<code>somme_lrg</code>	<code>somme_lc</code>	<code>somme_lrd</code>
XXX	11/11/2012	8	16	8

Tableau 4-11 : Exemple de la base de données "entretien_hivernal" après découpage

<code>ref_circuit</code>	<code>date</code>	<code>type_ligne</code>	<code>S_passages</code>
XXX	11/11/2012	<code>lrg</code>	8
XXX	11/11/2012	<code>lc</code>	16
XXX	11/11/2012	<code>lrd</code>	8

4.6 Création d'indicateurs météorologiques

La revue de littérature a souligné que les conditions météorologiques étaient une des causes à la dégradation des marquages au sol. Les bases de données météorologiques du MTQ (ou stations météorologiques du MTQ, appelées couramment SMR) et d'Environnement Canada (EC) permettent de créer des indicateurs qui pourraient expliquer cette usure. Les données utilisées sont les températures de l'air moyennes, maximales et minimales. Trois types de températures sont disponibles dans le cas des SMR : température de l'air, température de la surface de la chaussée et point de rosée. Dans les sous-parties suivantes, il n'y aura pas de distinction entre les données provenant du MTQ ou d'Environnement Canada, car elles ont été traitées de la même façon.

4.6.1 Lien entre les stations météorologiques et les RTSS

Les données des stations météorologiques ont été fournies avec une table fournissant leurs coordonnées géographiques. De plus, il faut rappeler que la BGR (voir Tableau 3-4) permet d'obtenir la zone géographique rectangulaire dans laquelle est inscrit le RTSS : les coordonnées « Geometry_XLO » et « Geometry_YLO » correspondent au coin inférieur gauche du rectangle, tandis que « Geometry_XHI » et « Geometry_YHI » sont les coordonnées du point supérieur droit (voir Figure 4-3). Il s'agit maintenant de choisir une méthode pour faire le lien entre ces deux jeux de coordonnées. L'idée est de calculer le centre du rectangle incluant le tronçon, puis de calculer la distance entre ce point et toutes les stations. La station associée à ce RTSS correspond à celle qui a la distance minimale avec le centre du rectangle. La Figure 4-3 illustre un exemple de calcul de distance entre un RTSS et trois stations météorologiques.

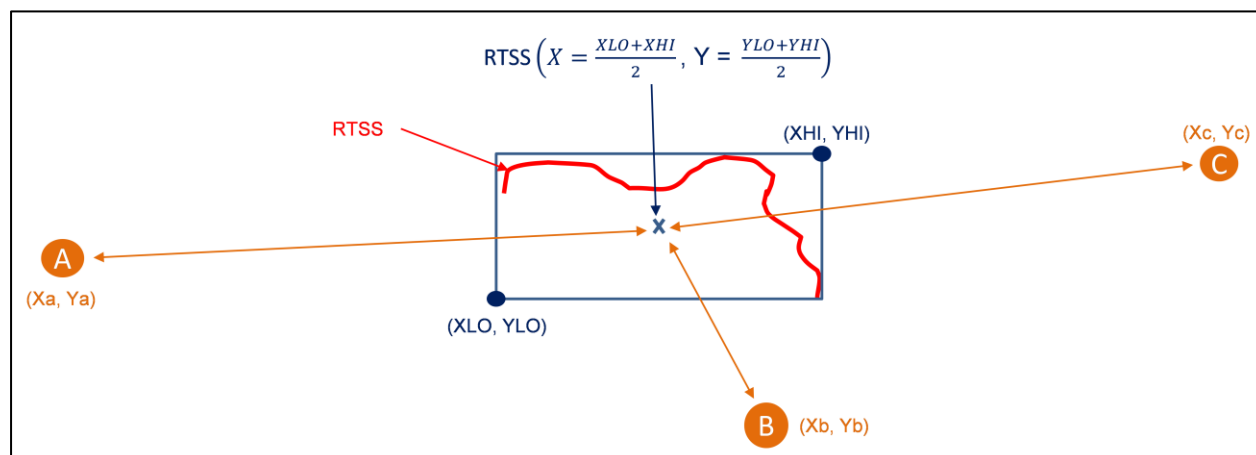


Figure 4-3 : Schéma illustrant la détermination de la station la plus proche

La formule pour déterminer la station la plus proche du « centre » du RTSS est écrite ci-dessous (dans le cas de trois stations, A, B et C).

Soit :

- RTSS (X, Y) les coordonnées du centre du rectangle dans lequel est inscrit le RTSS (en conique lambert) ;
- A (X_a, Y_a) B (X_b, Y_b) et C (X_c, Y_c) les coordonnées des différentes stations (en conique lambert) ;
- (XLO, YLO) et (XHI, YHI) les coordonnées des coins inférieurs gauches et supérieurs droits du rectangle dans lequel est inscrit le RTSS (en conique lambert).

- $Dist(A, B) = \sqrt{(X_x - X_y)^2 + (Y_x - Y_y)^2}$ avec A (X_x, Y_x) et B (X_y, Y_y) deux points de l'espace

$$station_{la\ plus\ proche} = argmin_{S \in \{A, B, C\}} Dist(S, RTSS)$$

Dans le cas de la Figure 4-3, la station la plus proche du RTSS est la deuxième (X_b, Y_b).

Pour l'ensemble des données, il a fallu comparer la distance entre environ 200 RTSS et plus de 120 stations (dans le cas des stations d'EC, il n'y a que 4 SMR). Ce travail a été effectué automatiquement à l'aide d'un programme écrit dans le langage Python, le résultat étant une table qui associe pour chaque RTSS la station météo la plus proche : « association_rtss_station_ec.txt » pour les stations d'EC et « association_rtss_station_mtg.txt » pour celles du MTQ. La distance entre le point représentant le RTSS et la station y a été ajoutée pour permettre de filtrer les données analysées selon la proximité à la station météorologique.

4.6.2 Génération des indicateurs météorologiques

Une fois la station la plus proche trouvée, il faut créer des indicateurs cohérents pouvant expliquer l'usure du marquage. Ce travail s'est effectué en deux étapes :

- 1- compiler les fichiers des stations météorologiques en un fichier normalisé ;
- 2- utiliser les fichiers compilés pour générer des indicateurs agrégés entre deux périodes de mesure de durabilité ou de rétro réflexion.

4.6.2.1 Compilation des fichiers météo

Cette section ne concerne que les données d'EC, les SMR étant déjà disponibles en un seul fichier par station.

L'étude s'étend sur les années 2012 et 2013 et EC ne fournit qu'un fichier par année et par station. De plus, les fichiers disposent d'un paragraphe fournissant les caractéristiques de la station précédant l'en-tête du fichier. Nous avons choisi d'assembler toutes les données d'une même station dans un seul fichier, en supprimant l'en-tête. Le travail de compilation consiste donc à télécharger automatiquement les fichiers nécessaires depuis le site internet d'EC, à extraire les informations météorologiques de chaque fichier et à regrouper les fichiers de 2012 et

de 2013 en un seul fichier par station. Ce travail a été effectué à l'aide d'un programme écrit dans le langage Python. La Figure 4-4 ci-dessous schématise le principe de la compilation des fichiers.

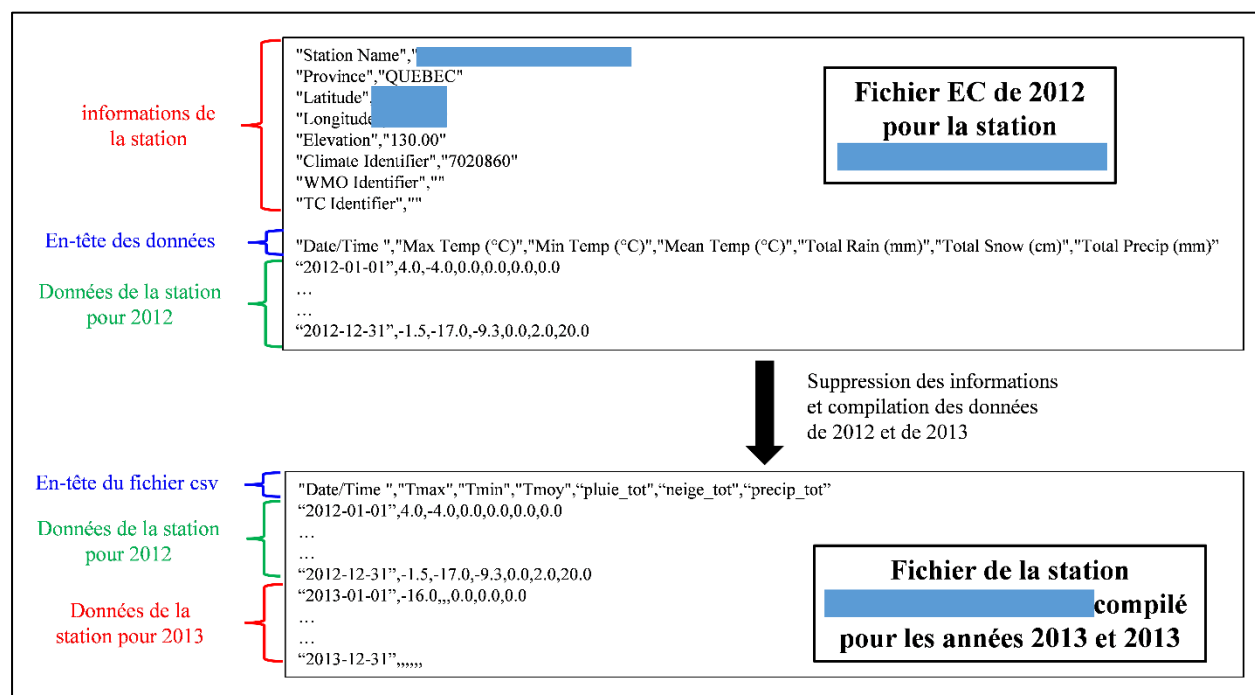


Figure 4-4 : Exemple d'un fichier EC avant et après la compilation

4.6.2.2 Choix et génération des indicateurs météorologiques

Une fois que le lien entre les stations météo et les RTSS est fait et que les fichiers des stations sont dans un format normalisé plus facile à exploiter, il est possible d'associer ces données avec la rétroreflexion et la durabilité.

L'idée est de créer des indicateurs pouvant expliquer la variation de deux états de durabilité ou de rétroreflexion. Cependant, l'intervalle de temps entre deux relevés consécutifs n'est pas constant (de 80 jours en moyenne pour la durabilité à environ 180 pour la rétroreflexion). Les indicateurs choisis doivent donc pouvoir être agrégés sur des périodes de temps variables. Par ailleurs, choisir la température moyenne entre deux relevés de rétroreflexion distants de 180 jours ne fournirait aucune information (indicateur peu sensible), tandis que le nombre de jours où la température était négative pourrait être plus explicatif (c'est-à-dire corrélé avec la dégradation du marquage).

Les indicateurs générés grâce aux données d'EC sont les suivantes :

- T_{\min} : température la plus basse relevée dans la journée ;
- T_{\max} : température maximale relevée dans la journée ;
- T_{moy} : température moyenne de la journée ;
- pluie_tot : quantité de pluie tombée dans la journée ;
- neige_tot : quantité de neige tombée dans la journée.

Remarque : il est important de noter qu'il existe deux indicateurs différents pour quantifier la neige et la pluie : « pluie_tot » et « neige_tot » sont obtenus grâce aux données d'EC et « somme_eau » et « somme_neige » sont obtenus grâce aux données de l'entretien hivernal (voir la partie 4.5.1)

La température est mesurée en degrés Celsius. Dans le cas des données fournies par le ministère, les températures T_a (de l'air), T_s (à la surface de la chaussée) et T_d (point de rosée, c'est-à-dire la température minimale à laquelle la rosée ne se forme pas, pour une pression et une humidité donnée) sont recensées toutes les 10 minutes, tandis que pour les données d'EC, les températures de l'air maximale, minimale et moyenne sont fournies pour la journée (il est possible de le constater sur la Figure 4-4). Afin d'utiliser les mêmes fonctions de calcul des indicateurs météorologiques pour les données d'EC et du MTQ, le choix a été de calculer la température moyenne, minimale et maximale par jour des trois séries de températures fournies par le ministère, afin d'avoir les mêmes données qu'EC. Les indicateurs générés entre deux dates successives t_1 et t_2 (séparées de n jours) pour un même RTSS sont fournis dans le Tableau 4-12.

Tableau 4-12 : Indicateurs générés grâce aux données météorologiques

Indicateur	Rôle	Calcul	
nbre_J_T_negatif	Nombre de jours où la température maximale est négative entre les deux dates	test(t)= 1 si $T_{\max}(t) < 0$	$\sum_{t=t1}^{t2} test(t)$
nbre_J_gel_degel	Nombre de jours où la température a été positive et négative dans la même journée entre les deux dates	test(t)= 1 si $T_{\max}(i) > 0$ et $T_{\min}(i) < 0$	
nbre_J_delta_T_X* * $X \in \{5, 10, 15, 20\}$	Nombre de jours où la température a varié de X°C ou plus dans la même journée entre les deux dates	test(t)= 1 si $T_{\max}(i) - T_{\min}(i) > X$	
nbre_J_gel_consec	Plus grand nombre de jours consécutifs pendant lesquels il a gelé (la température est restée négative) entre les deux dates	max(nombre de jours consécutifs où $T_{\max} < 0$)	
neige_tot	Quantité totale de neige tombée entre deux dates	$\sum_{t=t1}^{t2} neige_tot(t)$	
pluie_tot	Quantité totale de pluie tombée entre deux dates	$\sum_{t=t1}^{t2} pluie_tot(t)$	
ecart_type	Écart type des températures moyennes entre deux dates	ST_{moy}^{**}	

** Soit n observations d'une variable aléatoire réelle x_1, \dots, x_n de moyenne empirique \bar{x} , l'écart-

type empirique est : $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

La fonction de la bibliothèque scientifique numpy dans le langage python est utilisée pour les calculs de moyenne, écart-type, etc.

Tableau 4-13 : Échantillon d'un fichier météorologique d'EC

Date/heure	Tmin	Tmax	Tmoy	pluie_tot	neige_tot
2012-01-01	-7	-1	-4	0	2
2012-01-02	-5	-3	-4	0	3
2012-01-03	-8	1	-5	5	0
2012-01-04	-10	-4	-7	0	12
2012-01-05	-15	-4	5	0	0
2012-01-06	-3	6	1	0	0
2012-01-07	7	12	9	10	0

En appliquant la méthode de calcul des indicateurs présentés succinctement dans le Tableau 4-12 sur l'exemple du Tableau 4-13, les valeurs des indicateurs sont les suivantes :

- `nbre_J_T_negatif = 4 ;`
- `nbre_J_gel_degel = 2 ;`
- `nbre_J_delta_T_10 = 1 ;`
- `nbre_J_gel_consec = 2 ;`
- `neige_tot = 17 ;`
- `pluie_tot = 15 ;`
- `ecart_type = 5,9.`

Les indicateurs ci-dessus peuvent donc être calculés quel que soit le nombre de jours entre deux dates, qu'il y ait des données manquantes ou pas. Un test a été ajouté dans le programme permettant de calculer ces indicateurs à condition que les données soient disponibles pour au moins 70 % des jours.

4.7 Conclusion des traitements de données

4.7.1 Relation entre les données

Tous les traitements mentionnés plus haut dans le chapitre 4 ont eu pour but de générer une base de données dans le logiciel Microsoft Access dont les tables sont prêtes pour l'analyse de la dégradation du marquage en fonction de différents facteurs. Les modifications apportées permettent de lier toutes les tables entre elles grâce à différentes requêtes SQL.

La Figure 4-5 permet de montrer les liens entre les différents jeux de données. Les liens en bleu représentent les jointures entre les fichiers sous Microsoft Access. Le lien en vert est généré à l'aide de programmes écrits dans le langage Python pour déterminer la station météorologique la plus proche de chaque RTSS (voir section 4.6.1). Le lien en rouge désigne le nom de la station la plus proche pour calculer les indicateurs météorologiques.

Ainsi, il est possible de rattacher pour chaque RTSS (unité spatiale choisie pour le projet) et pour chaque intervalle de temps (déterminé par deux mesures de rétro réflexion ou de durabilité successives) toutes les données fournies pouvant avoir un lien avec la dégradation du marquage.

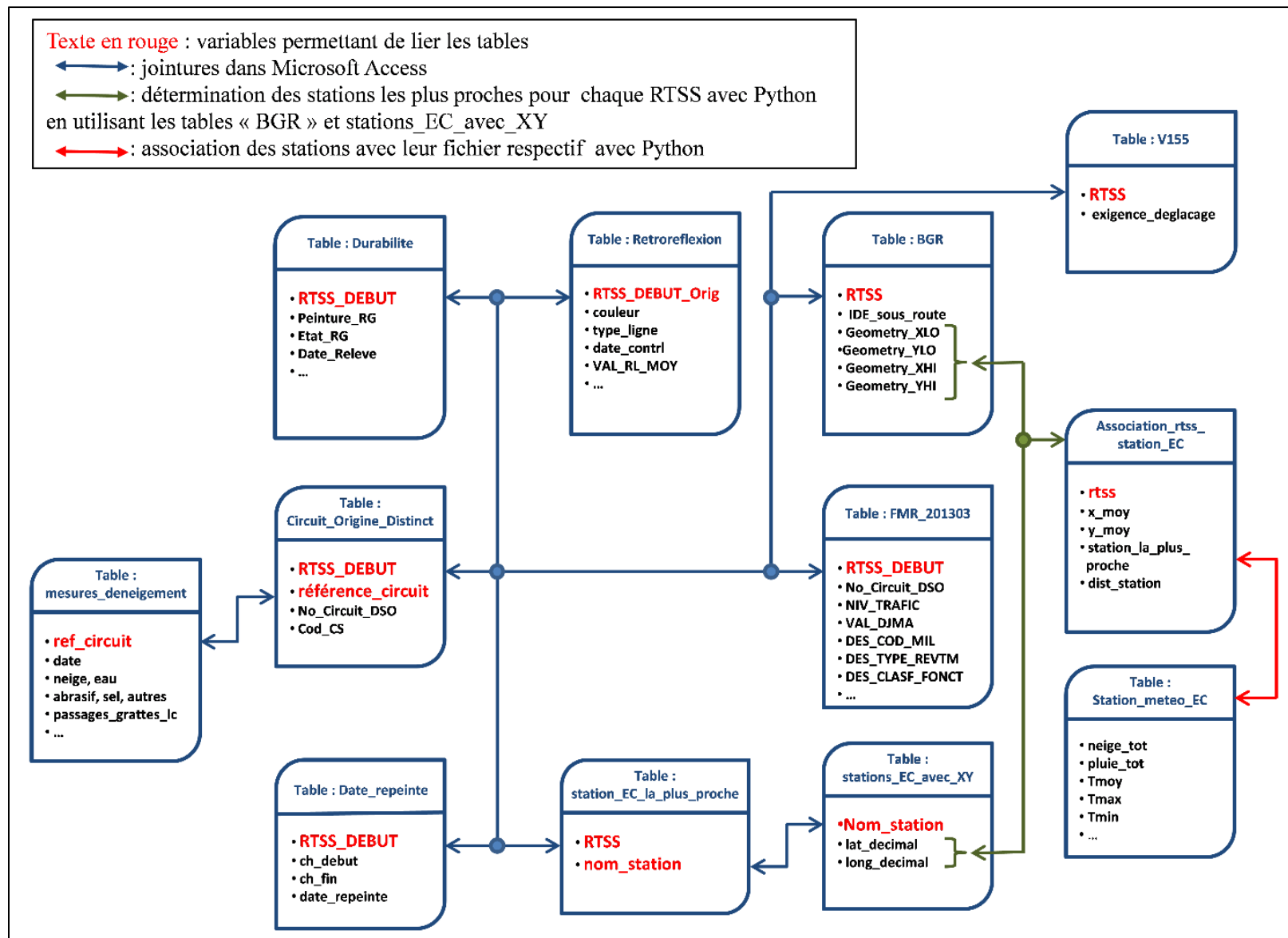


Figure 4-5 : Liens entre les tables de données

4.7.2 Résumé des agrégations et limites des jeux de données

Les découpages en chaînages apparemment aléatoires font qu'il n'est pas possible de les utiliser comme unité d'analyse de la rétroreflexion et de la durabilité du marquage et imposent d'utiliser une unité spatiale commune moins précise : le RTSS. Dépendamment du type de données, des choix ont été effectués pour les agréger au niveau du RTSS. De plus, Les opérations effectuées sur les tables ont permis de créer une base de données avec toutes les données disponibles et leurs relations. Le Tableau 4-14 résume les méthodes d'agrégation en fonction des données.

Tableau 4-14 : Méthodes d'agrégation utilisées sur les différentes variables

Table	Données	Type d'agrégation
V-155	Exigence de déglçage	Fréquence maximale
durabilite	Type_peinture	
FMR	Age_revtm, classe_fonct, type_revtm, milieu, djma, djma_camions, vit_max	
BGR	Coordonnées des RTSS	Moyenne
durabilite	durab	Médiane
rétroreflexion	retro	

La façon de coder les types de lignes pour les marquages a été différente dans le cas des relevés de durabilité, de rétroreflexion et de l'entretien hivernal. Le travail de compréhension et d'adaptation du codage des lignes a engendré une diminution du nombre de lignes exploitables par RTSS.

Il faut rappeler aussi que la collecte des données sur l'entretien hivernal a été effectuée sur une échelle moins précise que le RTSS, à savoir le circuit : tous les RTSS d'un même circuit auront les mêmes données d'entretien hivernal. La table « Circuit_Origine » (voir section 3.5.3) a été créée manuellement avec l'aide du MTQ pour ramener les relevés des déneigements à l'échelle du RTSS, et donc faire le lien entre les données de l'entretien hivernal et les autres données (voir Figure 4-5). Toute erreur dans cette table entraînera des ajouts de données non-pertinentes ou l'omission de données utiles pour l'analyse.

Enfin, les stations météorologiques importées du site d'environnement Canada ne contiennent que des informations sur la température de l'air à une distance variant de 450 m à près de 80 km des RTSS considérés (voir Figure 4-6). De plus, l'idéal aurait été d'obtenir des caractéristiques plus proches de la chaussée, telle que la température de surface du pavage fournie dans les SMR. Pour ce qui est des SMR, les données sont beaucoup plus précises, mais le nombre restreint de

stations dont les données ont été rendues disponibles fait que celles-ci sont souvent très éloignées des RTSS, comme l'illustre la Figure 4-6 (seuls les circuits localisés en Estrie sont situés à moins de 100 km des SMR).

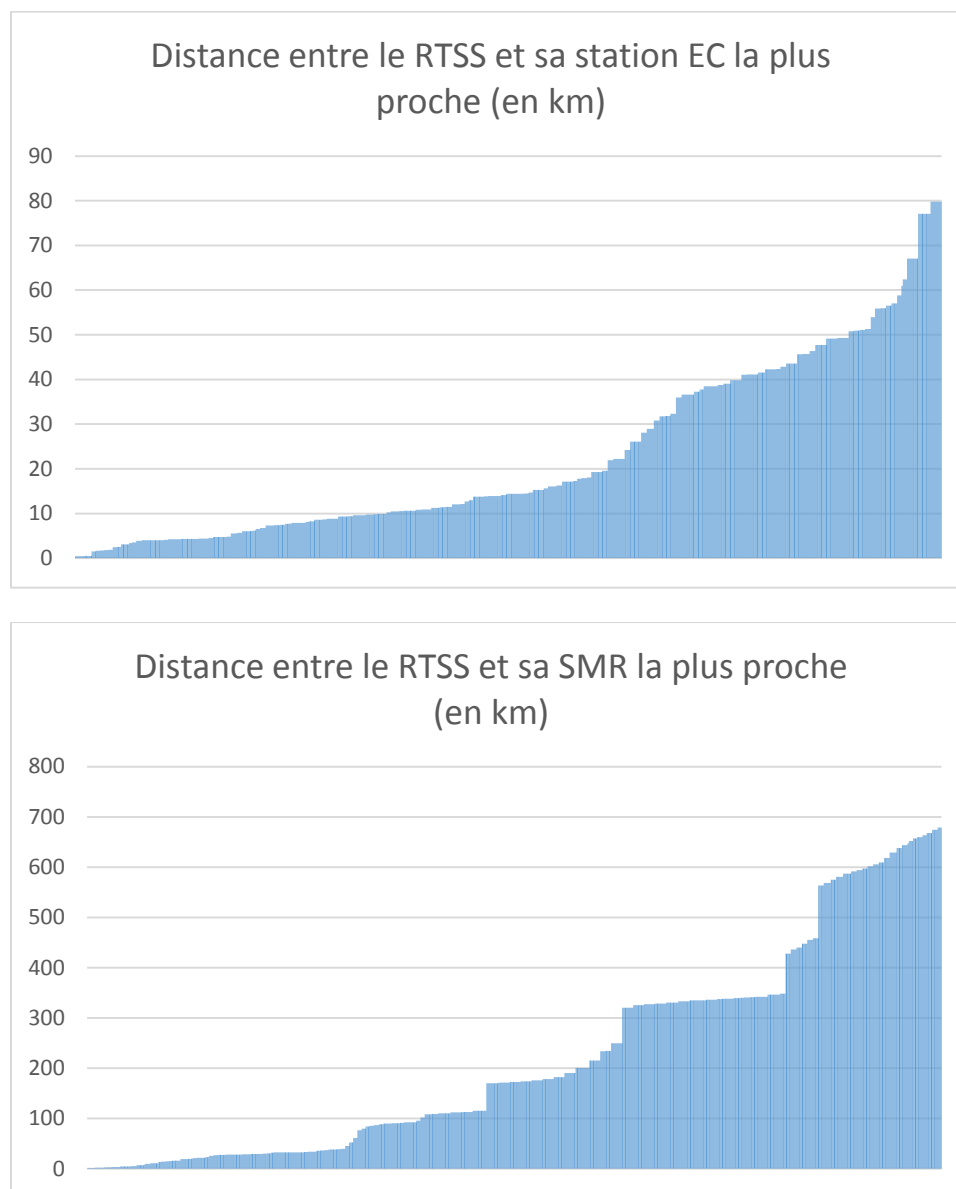


Figure 4-6 : Distance entre les RTSS et leur station EC (figure du dessus) ou leur SMR (figure du dessous) la plus proche trié par ordre croissant

Chapitre 5 **CALCUL, ANALYSE ET RÉSULTATS DE LA DÉTÉRIORATION DU MARQUAGE**

Une fois les indicateurs pouvant expliquer la dégradation des marquages trouvés, il faut les lier à la perte de qualité du marquage. Pour cela, la méthode choisie est de calculer la variation de durabilité et de rétroréflexion dans le temps et de générer un fichier avec ces variations et les variables explicatives préalablement calculées. Ensuite, il faut faire une étude statistique pour étudier les relations entre les données et l'influence qu'elles peuvent avoir sur la dégradation. Ces deux approches font l'objet de ce chapitre.

5.1 Calcul des variations de durabilité et de rétroréflexion

5.1.1 Méthode utilisée

Le calcul des variations de durabilité et de rétroréflexion lors de l'hiver 2012 / 2013 est le cœur de ce projet. Tous les indicateurs générés dans le Chapitre 4, qu'ils soient du ministère ou publics, ont été choisis pour être associés aux pertes de qualité du marquage. Cette partie explique la méthode utilisée pour calculer ces variations et associer les indicateurs en fonction du RTSS et de l'intervalle de temps entre deux mesures de rétroréflexion ou de durabilité successives. Les variations sont déterminées de la même façon dans le cas de la rétroréflexion et de la durabilité mais de façon indépendante, il n'y a donc aucune distinction dans la description de la méthodologie.

Un programme écrit dans le langage Python a été rédigé dans but de faire les opérations suivantes :

- calculer la variation de durabilité (ou de rétroréflexion) entre deux dates successives pour un même RTSS ;
- associer à chaque RTSS ses caractéristiques qui ne varient pas dans le temps (au moins dans le temps de l'étude) ;
- associer à chaque RTSS et pour chaque intervalle de temps les variables explicatives qui varient dans le temps.

Le Tableau 5-1 fournit, pour chaque RTSS et chaque intervalle de date, les indicateurs disponibles et leur source originale.

Tableau 5-1 : Indicateurs disponibles dans la table générée par le script de calcul de variation de durabilité / rétroréflexion

Indicateurs	Source d'origine
date_fin, delta_date, type_ligne, peinture, couleur (seulement pour la rétroréflexion), retro_init (ou durabilite_init), delta_retro (ou delta_durab), type_ligne	fichiers de durabilite / retroreflexion (MTQ)
exigence_deglacage	fichier V-155 (MTQ)
x_moy, y_moy	fichier BGR (MTQ)
Age_revtm, classe_fonct, type_revtm, milieu, djma, djma_camions, vit_max	fichier FMR (MTQ)
Nom_station, dist_station	table association_rtss_station (calculée)
nbre_J_T_negatif, nbre_J_gel_degel, nbre_J_delta_T_20, nbre_J_delta_T_15, nbre_J_delta_T10, nbre_J_delta_T_5, nbre_J_gel_consec, pluie_tot, neige_tot, ecart_type_T	Fichiers compilés des stations EC (MTQ) les plus proches de chaque RTSS. Ces indicateurs sont calculés pour la température de l'air fournie par EC et les 3 types de températures fournies par le MTQ (EC/MTQ)
somme_abrasif, somme_sel, premiere_neige, autres_abrasifs, S_passages, type_ligne	table entretien_hivernal (MTQ + nettoyage et agrégation manuelle)

Les nombres d'enregistrements présents dans les fichiers résultants sont les suivants : il y a 1869 enregistrements dans le fichier de durabilité et 197 dans celui de la rétroréflexion. La différence de taille entre les deux fichiers s'explique par le fait qu'il n'y a eu que deux périodes de collecte dans le cas de la rétroréflexion, ce qui permet de ne calculer qu'une seule variation, alors qu'il y en a eu cinq pour durabilité (en incluant l'enregistrement généré grâce aux dates de repeinte), soit quatre variations. De plus, certains RTSS n'ont été mesuré que sur une des deux périodes pour la rétroréflexion, ce qui diminue encore le nombre de variations calculables.

5.1.2 Allure des variations obtenues

Avant de commencer les analyses statistiques, une analyse descriptive permet de se rendre compte de l'allure des données obtenues. Les Figure 5-1 et Figure 5-2 font l'état des données de durabilité, tandis que les Figure 5-3 et Figure 5-4 concernent les données de rétroréflexion.

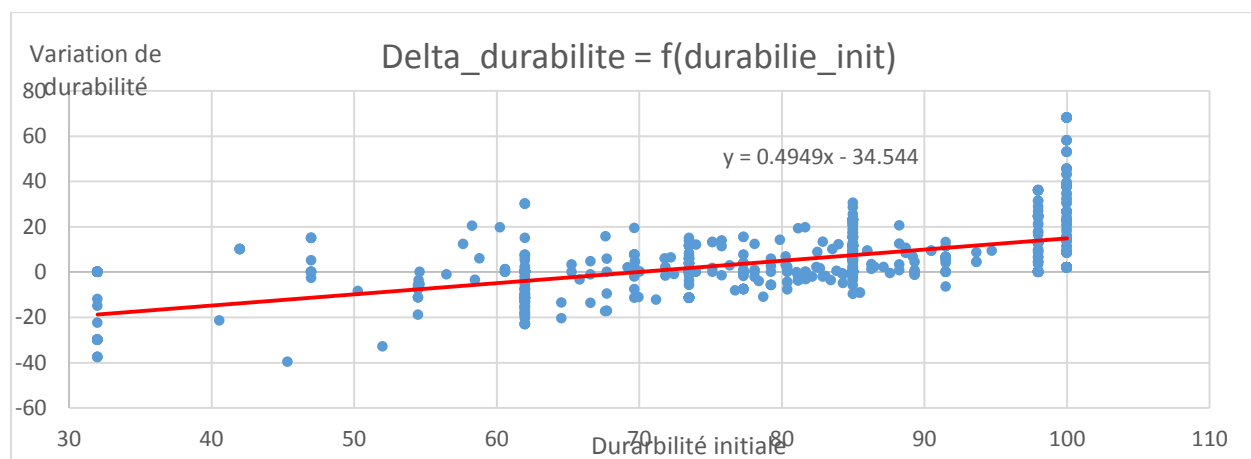


Figure 5-1 : Variation de durabilité en fonction de la durabilité initiale

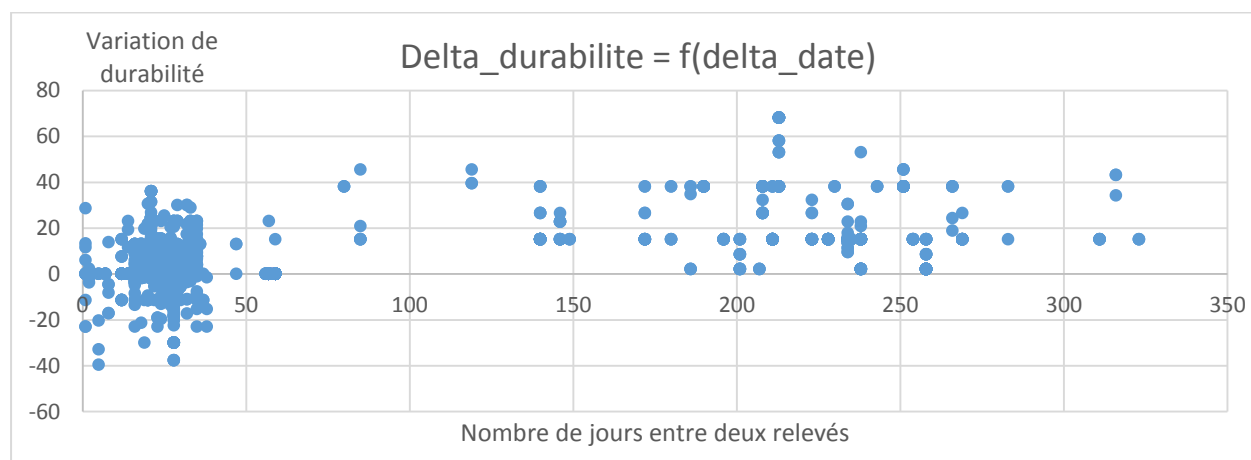


Figure 5-2 : Variation de durabilité en fonction du nombre de jours entre deux relevés

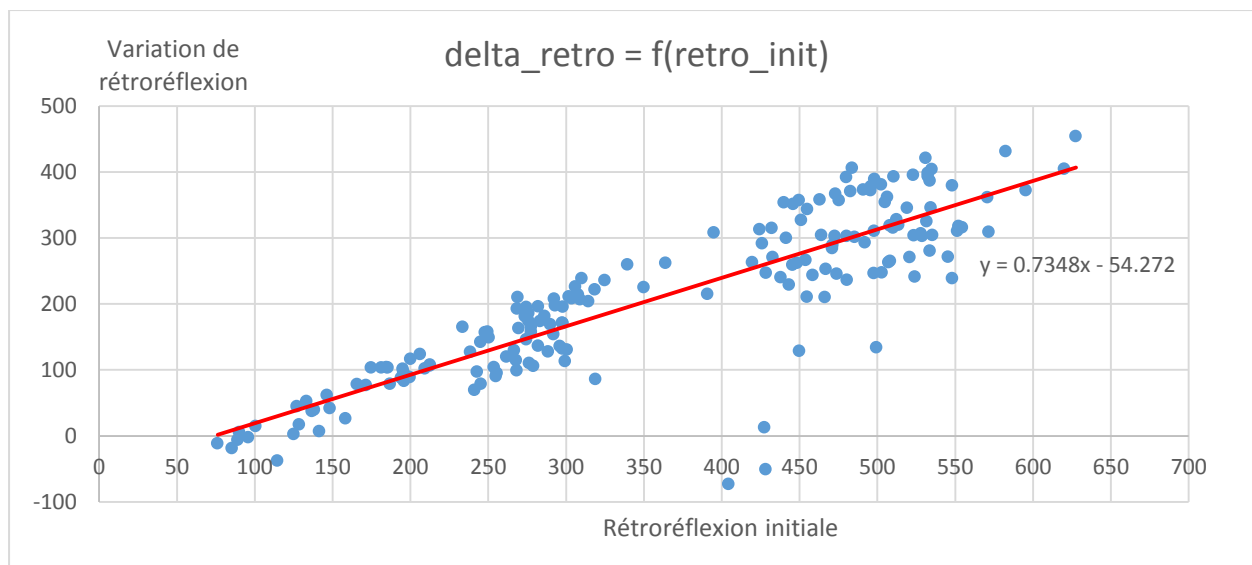


Figure 5-3 : Variation de rétroréflexion en fonction de la rétroréflexion initiale

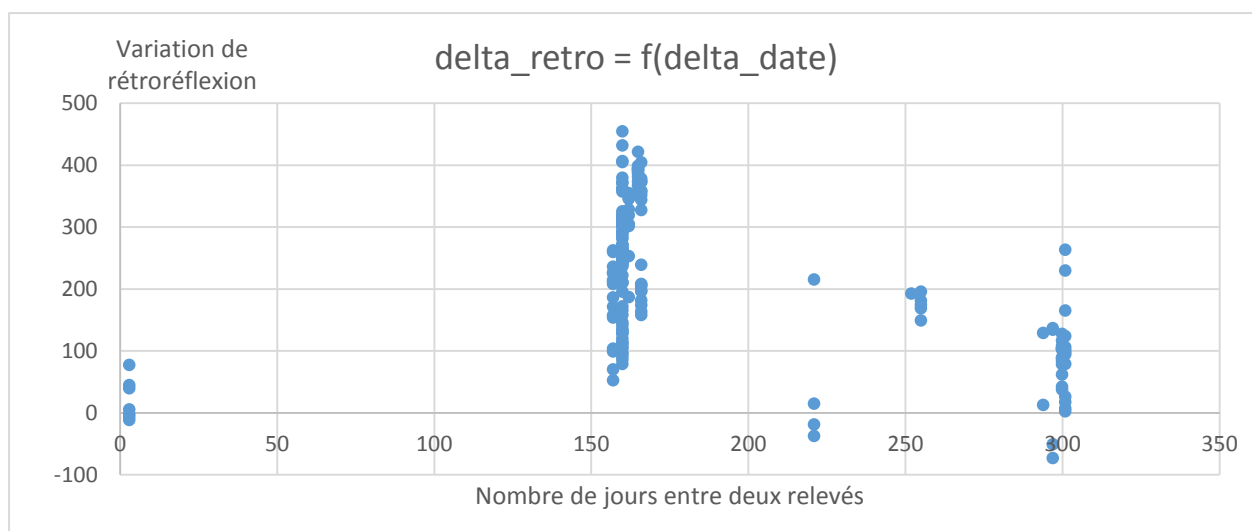


Figure 5-4 : Variation de rétroréflexion en fonction du nombre de jours entre deux relevés

Cette étude préliminaire permet de faire plusieurs conclusions :

- Plus les valeurs initiales de durabilité et de rétroréflexion sont élevées et plus la perte est grande : la perte de qualité du marquage est non linéaire.
- Il existe des variations négatives de durabilité et de rétroréflexion, ce qui signifie une amélioration du marquage ($\Delta \text{durabilité} = \text{durabilité}(t_2) - \text{durabilité}(t_1)$ avec $t_1 < t_2$). Il est nécessaire de les retirer pour déterminer les facteurs causant la dégradation du marquage ;

- Le nombre de jours entre deux relevés est très élevé pour la rétroréflexion (autour de 160 jours), ce qui implique une grande période d'agrégation des données. Pour la durabilité, on observe une grosse densité de points sur 30 jours en moyenne et un nuage de points plus dispersé sur un intervalle de jours plus élevé. Cela correspond aux variations de durabilité calculées grâce à la date de repeinte insérée pour augmenter le nombre d'enregistrements (voir partie 4.3.3).

Ces résultats sont à prendre en compte lors de l'interprétation des modèles de durabilité et de rétroréflexion.

5.2 Corrélations entre les variables

Afin de couvrir tous les facteurs pouvant expliquer la perte de qualité du marquage au sol, de nombreux indicateurs sont utilisés, provenant de différentes sources. Avant de faire l'étude statistique, il est intéressant de regarder la corrélation entre les variables. Cela permet de savoir si deux variables sont liées, auquel cas une seule de ces deux variables peut suffire pour étudier l'impact du facteur mesuré sur les variations de durabilité et de rétroréflexion.

La corrélation entre deux variables se définit de la façon suivante :

$$\text{Soient } X \text{ et } Y \text{ deux variables, } Cor(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

$$\text{Avec } Cov(X, Y) = E[(X - E(X))(Y - E(Y))]$$

Où $Var(X)$ est la variance mathématique de la variable X et $E(X)$ son espérance mathématique.

Plus deux variables sont linéairement corrélées (positivement ou négativement), plus leur coefficient de corrélation est proche de 1 ou -1. Le but est donc de choisir dans les modèles statistiques un maximum de données dont la valeur absolue du coefficient de corrélation soit proche de 0 (variables indépendantes).

Les données doivent être binaires ou continues pour appliquer la corrélation. Avec cette méthode, les groupes de variables suivants sont donc étudiés (pour la durabilité et la rétroréflexion) :

- Les données du FMR (transformées en données binaires pour appliquer la corrélation) ;
- indicateurs météorologiques générés à partir des données météorologiques d'EC ;
- indicateurs météorologiques générés à partir des données météorologiques du MTQ ;

- les données de la collecte hivernale.

Les coefficients de corrélation sont calculés à l'aide du logiciel Gretl⁶ et sont mis sous forme matricielle. La matrice résultante des indicateurs météorologiques d'environnement Canada pour la variation de durabilité est présenté en Figure 5-5 à titre d'exemple mais toutes les matrices sont dans l'annexe D.

	delta_durab	durab_init	delta_date	nbre_J_T_negatif	nbre_J_gel_degel	nbre_J_delta_T20	nbre_J_delta_T15	nbre_J_delta_T10	nbre_J_delta_T5	nbre_J_gel_consec	pluie_tot	neige_tot	neigeEC_50cm	ecart_type_T
delta_durab	1,0	0,6	0,6	0,6	0,5	0,2	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6
durab_init	0,6	1,0	0,6	0,6	0,6	0,3	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6
delta_date	0,6	0,6	1,0	0,9	0,9	0,5	0,7	0,9	1,0	0,8	0,8	0,6	0,5	0,9
nbre_J_T_negatif	0,6	0,6	0,9	1,0	0,8	0,4	0,5	0,8	0,8	0,9	0,6	0,7	0,5	0,9
nbre_J_gel_degel	0,5	0,6	0,9	0,8	1,0	0,6	0,7	0,9	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3	0,8
nbre_J_delta_T20	0,2	0,3	0,5	0,4	0,6	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5
nbre_J_delta_T15	0,5	0,4	0,7	0,5	0,7	0,9	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,7
nbre_J_delta_T10	0,6	0,6	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8	1,0	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,9
nbre_J_delta_T5	0,6	0,6	1,0	0,8	0,9	0,5	0,7	1,0	1,0	0,8	0,8	0,5	0,4	0,9
nbre_J_gel_consec	0,5	0,5	0,8	0,9	0,7	0,5	0,6	0,8	0,8	1,0	0,6	0,6	0,6	0,9
pluie_tot	0,5	0,5	0,8	0,6	0,6	0,4	0,5	0,7	0,8	0,6	1,0	0,7	0,6	0,7
neige_tot	0,4	0,4	0,6	0,7	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	1,0	0,9	0,6
neigeEC_50cm	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,9	1,0	0,5
ecart_type_T	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	0,5	1,0

Figure 5-5 : Matrice des corrélations des indicateurs météorologiques d'EC pour la variation de durabilité

Les conclusions des analyses de corrélation sont les suivantes :

- Les corrélations se ressemblent entre la durabilité et la rétroréflexion. La différence principale entre ces deux ensembles de données est l'écart temporel entre deux mesures successives (environ 80 jours en moyenne pour la durabilité et 180 pour la rétroréflexion) et cela semble ne pas avoir d'influence sur la corrélation des données.
- Les corrélations des données de l'entretien hivernal sont attendues :

⁶ Le logiciel libre Gretl est disponible sur le site web <http://gretl.sourceforge.net/>

Somme_sel-Somme_abrasif : il paraît intuitif de penser que ces matériaux soient utilisés de façon conjointe.

Somme_neige-Somme_passage : le nombre de passages de déneigeuses dépend de la quantité de neige tombée.

- Les données météorologiques sont globalement fortement corrélées entre elles. Ce résultat était prévisible puisque tous les indicateurs sont générés à partir de la même variable : la température journalière (minimale, moyenne et maximale).

Cette analyse sommaire permet de se rendre compte que plusieurs indicateurs utilisés dans ce projet sont corrélés entre eux. Il faut en particulier faire attention à ne pas inclure trop d'indicateurs météorologiques simultanément. Cette étude des corrélations a aussi l'intérêt d'aiguiller le chercheur dans le choix des variables lors du développement des modèles de régression linéaire multiple.

5.3 Déterminations des indicateurs significatifs par régression linéaire multiple

Dans le but de déterminer les variables pouvant expliquer la perte de rétroflexion et de durabilité des marquages au sol, des modèles de régression linéaire multiple sont réalisés à l'aide du logiciel libre d'analyse statistique Gretl. Les fichiers « entretien-hivernal-durabilite.txt » et « entretien-hivernal-retroreflexion.txt » sont étudiés séparément dans le logiciel. La méthodologie et les résultats de ces analyses font l'objet des parties suivantes.

5.3.1 Principe et hypothèses

Soit une base de données avec n enregistrements, p variables explicatives $X_i = (1, X_{1,i}, \dots, X_{p,i})$ (i variant de 1 à n) et une variable dépendante $Y = (y_1, \dots, y_n)'$:

Le but est de trouver le vecteur $A = (a_0, a_1, \dots, a_p)'$

Tel que $Y = XA + \epsilon$ où $X = \begin{pmatrix} 1 & X_{1,1} & \dots & X_{p,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1,n} & \dots & X_{p,n} \end{pmatrix}$ et $\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}$ (résidus)

Pour que le modèle soit valable, il doit répondre à deux types d'hypothèses, résumées ci-dessous :

Hypothèses stochastiques :

- H_1 : les X_i sont aléatoires.
- H_5 : $cov(X_i, \epsilon_j) = 0 \forall i \neq j$, les résidus sont linéairement indépendants des variables exogènes.
- H_6 : $\epsilon \sim N_n(0, \sigma^2 I_n)$, les erreurs suivent une loi normale multidimensionnelle.

Hypothèses structurelles :

- H_7 : $X'X$ est régulière et $(X'X)^{-1}$ existe ; absence de colinéarité entre les variables explicatives.
- H_8 : $\frac{X'X}{n}$ tend vers une matrice finie non singulière lorsque $n \rightarrow \infty$.
- H_9 : $n > p + 1$, le nombre d'observations est supérieur au nombre de variables + 1.

Remarque : Dans ce cas, l'hypothèse H_6 implique les hypothèses H_2 , H_3 et H_4 suivantes :

- H_2 : $E(\epsilon_i) = 0$, le modèle est bien spécifié en moyenne ;
- H_3 : $V(\epsilon_i) = \sigma^2 \forall i$, homoscedascité des erreurs (variance constante) ;
- H_4 : $cov(\epsilon_i, \epsilon_j) = 0 \forall i \neq j$, pas d'autocorrélation des erreurs.

5.3.2 Méthodologie

Pour chacun des deux ensembles de données (durabilité et rétro réflexion), le principe est de tester des variables explicatives. Celles-ci sont considérées comme significatives si la valeur p est inférieure à 0,05. La valeur p représente la probabilité qu'une variable suivant la loi de la statistique du test soit supérieure ou égale à la valeur de la statistique si l'hypothèse nulle est vraie.

Ainsi, les variables explicatives sont testées de façon itérative en considérant les matrices de corrélation afin de gagner du temps lors du processus. Les modèles retenus sont ceux qui ont le meilleur R^2 ajusté pour le moins de variables explicatives possibles.

Le R^2 est une mesure de la qualité de la régression linéaire simple, mais sa valeur a tendance à augmenter avec le nombre de variables explicatives utilisées dans le modèle. Le R^2 ajusté est pondéré par le nombre de variables explicatives considérées, il est donc plus approprié :

$R_{aj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-m-1} (1 - R^2)$ avec n le nombre d'enregistrements et m le nombre de variables explicatives.

Ensuite, le modèle retenu est vérifié en s'assurant qu'il répond aux hypothèses. Puisque le modèle n'est pas estimé par Gretl si les hypothèses structurelles ne sont pas vérifiées, il ne reste qu'à s'assurer que les hypothèses stochastiques sont vérifiées :

- L'hypothèse H_1 est toujours vraie puisque les variables explicatives sont toutes aléatoires.
- Un graphique des valeurs résiduelles (ϵ_i dans le modèle) en fonction de la valeur prédite permet de vérifier l'hypothèse H_5 . Les valeurs devraient être contenues dans une bande horizontale centrée sur l'abscisse.
- Un diagramme Quantile-Quantile (appelé diagramme Q-Q) permet de vérifier l'hypothèse H_6 . Le nuage de points doit être le plus proche de la première bissectrice pour confirmer l'hypothèse.

5.3.3 Transformation de données

5.3.3.1 Les débits de véhicules et de camions

Les DJMA sont multipliés par le nombre de jours entre deux mesures successives (« delta_date ») afin d'obtenir le nombre moyen de véhicules sur le RTSS considéré pendant la période de temps considéré sous la variable « debit ». De même, le débit de véhicule est multiplié au pourcentage de camions moyen sur la route « val_pourc_camns » pour obtenir le débit de camions sous le nom de variable « debit_camions ». Ces opérations sont effectuées directement sous Gretl.

5.3.3.2 Données catégorielles

Pour utiliser des variables catégorielles dans des modèles de régression linéaire, il est nécessaire de les convertir en plusieurs variables binaires. Cette modification a été faite directement à l'aide du logiciel Gretl pour les variables « peinture », « exigence_deglacage », « age_revtn »,

« classe_fonct », « type_revtm » et « milieu ». La Figure 5-6 permet de comprendre la conversion.

Remarque : pour une variable catégorielle de pouvant avoir n valeurs, la conversion permet de créer n-1 valeurs indépendantes puisque la n-ième est colinéaire aux n-1 autres. Dans l'exemple ci-dessous, la variable « alkyde » n'est pas utilisée dans les modèles puisque colinéaire aux variables « eau » et « epoxy ».

RTSS	type_voie	type_ligne	peinture		
	C	rd	1 - Eau		
	D	rg	2 - Époxy		
	G	cl	3 - Alkyde		

RTSS	Type_voie	Type_ligne	eau	epoxy	alkyde
	C	rd	1	0	0
	D	rg	0	1	0
	G	cl	0	0	1

Figure 5-6 : Passage d'une variable catégorielle (« peinture ») en trois variables binaires (« eau », « epoxy » et « alkyde ») à l'aide du logiciel Gretl

Un choix différent a été fait pour les variables « type_voie » (cette variable correspond à la dernière lettre du codage du RTSS, elle permet de savoir si la chaussée est contiguë ou séparée, voir Tableau 4-7) et « type_ligne ». En effet, il est cohérent de supposer que les marquages au sol ont un comportement identique dans les deux sens de circulation. Il est donc judicieux de les réunir dans des catégories plus agrégées lors de conversion des données précédemment mentionnées.

Les données binaires sont déterminées de la façon suivante (les Tableau 3-1 et Tableau 3-2 peuvent aider le lecteur à comprendre les associations) :

- rive_externe = 1 si (type_voie = C & type_ligne ≠ cl) OU (type_voie = D & type_ligne = rd) OU (type_voie = G & type_ligne = rg) ;
- rive_interne = 1 si (type_voie = D & type_ligne = rg) OU (type_voie = G & type_ligne = rd) ;

- $\text{delimitation_voie} = 1$ si $\text{type_voie} \neq C$ & $\text{type_ligne} = \text{cl}$;
- $\text{ligne_mediane} = 1$ si $\text{type_voie} = C$ & $\text{type_ligne} = \text{cl}$.

La Figure 5-7 ci-dessous illustre cette conversion :

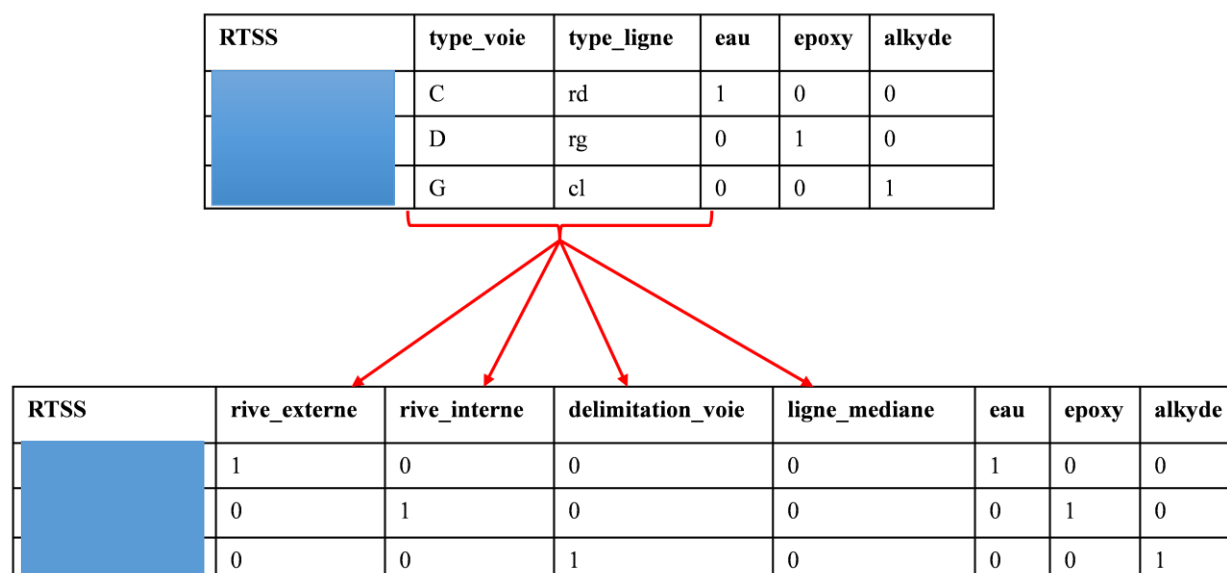


Figure 5-7 : Conversion des variables « type_voie » et « type_ligne » sous Gretl

Les variables sont maintenant prêtes pour estimer des modèles de régression linéaire multiple.

5.3.4 Modèles pour la rétro réflexion

Les distances aux stations du MTQ étant généralement très élevées, le modèle général ne considère pas les indicateurs météorologiques générés par celles-ci. Un modèle restreint aux RTSS distants de moins de 100 km des stations est tout de même présenté en partie 5.3.4.2 pour tirer profit des données fournies par le ministère.

5.3.4.1 Modèle général

Après de nombreuses itérations dans le but d'obtenir les modèles les plus simples et pertinents possibles, les variables explicatives sont fournies dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Régression linéaire de la variation de rétroflexion (136 enregistrements sur 192, R^2 ajusté de 0,892)

	coefficient	erreur std	t de Student	valeur p	⁷
const	-121,054	28,209	-4,291	<0,001	***
retroreflexion_init	0,616	0,038	16,190	<0,001	***
S_passages	0,094	0,023	4,062	<0,001	***
somme_sel	-0,030	0,004	-6,792	<0,001	***
neige_tot	0,446	0,047	9,410	<0,001	***
pluie_tot	-0,266	0,034	-7,916	<0,001	***
ligne_mediane	-64,789	13,631	-4,753	<0,001	***
eau	39,521	13,643	2,897	0,004	***
ecart_type_T	11,281	3,162	3,568	<0,001	***

Les diagrammes des valeurs résiduelles et Q-Q sont présentés les Figure 5-8 et Figure 5-9 ci-dessous.

⁷ Les étoiles permettent d'avoir un aspect visuel de la qualité de la valeur p :

- « * » : $0,01 < p < 0,05$
- « ** » : $0,005 < p < 0,01$
- « *** » ; $p < 0,005$

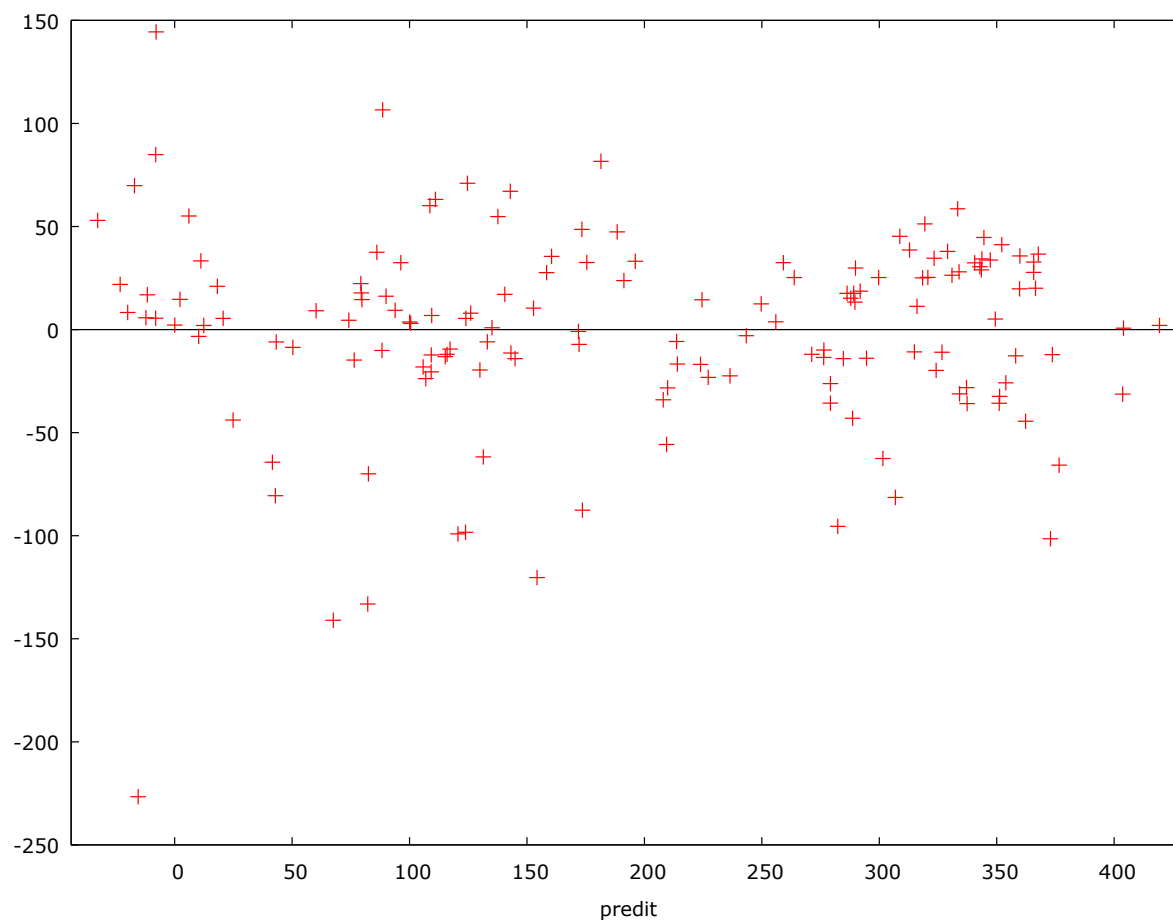


Figure 5-8 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la rétroréflexion

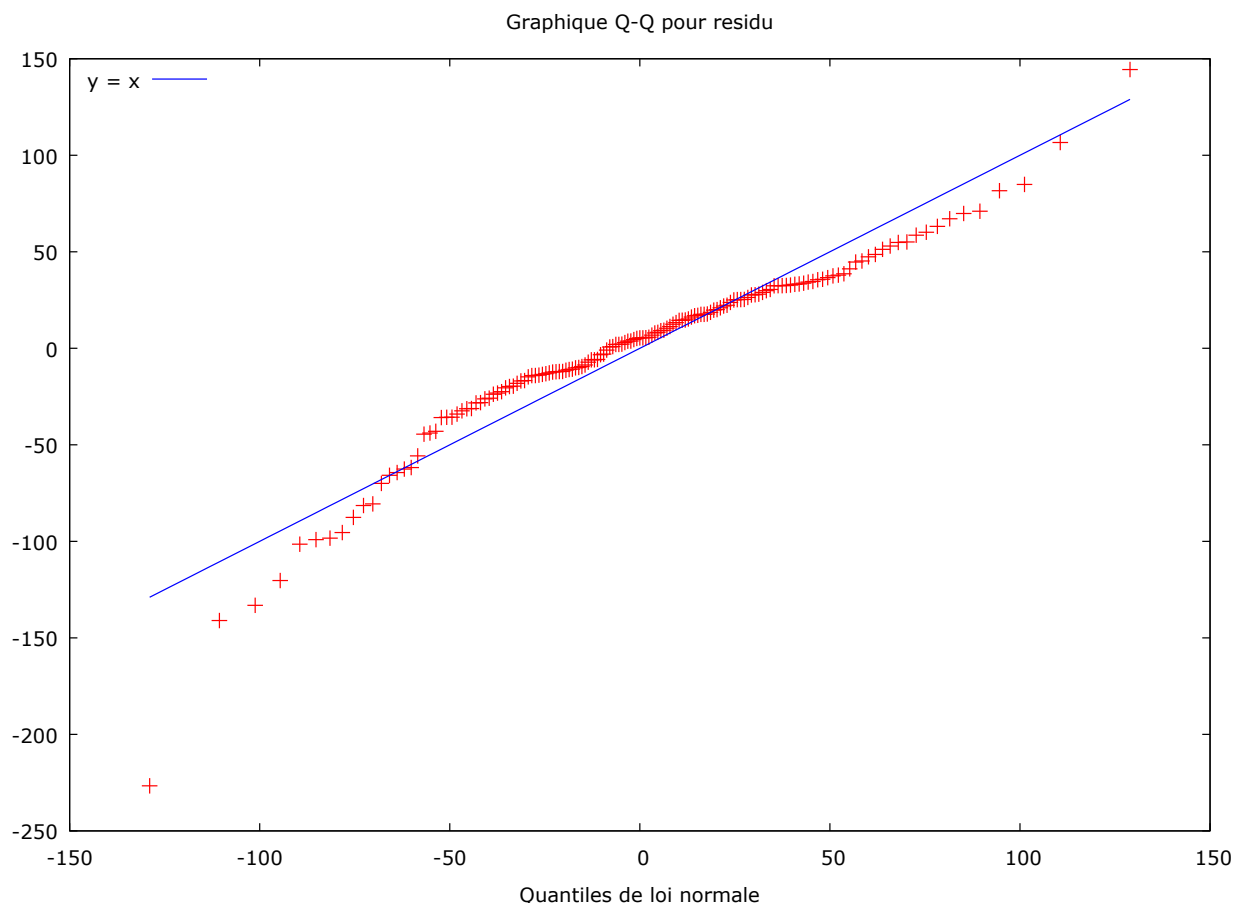


Figure 5-9 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la rétroreflexion

La Figure 5-8 montre que les résidus du modèle de rétroreflexion sont linéairement indépendants, l'hypothèse H_5 est donc vérifiée. De même pour l'hypothèse H_6 puisque le diagramme Q-Q suit de très près la première bissectrice d'après la Figure 5-9.

Malgré l'apparent très bon ajustement du modèle avec un R^2 ajusté de 0,892, il faut faire attention à l'interprétation des résultats à cause du faible nombre d'observations considéré (136 enregistrements, les variables limitantes étant les indicateurs provenant des données d'EC).

Le bilan du modèle final est mitigé. Le plus intéressant est le constat que la valeur de rétroreflexion initiale, le nombre de passages de déneigeuses, la quantité de neige tombée et l'écart type de température semblent impacter sur la perte de rétroreflexion du marquage au sol. De plus, les marquages à l'eau s'usent plus vite que les autres types de matériau, ce qui va dans le sens des travaux antérieurs présentées dans la revue de littérature. Il est cependant étonnant de constater que le coefficient de la quantité de sel utilisée soit négatif, ce qui signifierait que le sel

est associé à des dégradations plus faibles du marquage. De même, les lignes médianes semblent être protégées alors qu'en regardant les données de l'entretien hivernal, elles semblent touchées deux fois plus que les autres lignes par les déneigeuses.

5.3.4.2 Modèle restreint aux RTSS proches des stations météorologiques du MTQ

La même étude est effectuée en restreignant les observations aux RTSS dont les SMR sont situées à moins de 100 km pour voir si les indicateurs liés à la température à la surface de la chaussée et au point de rosée peuvent expliquer la dégradation du marquage. La taille de l'échantillon descend à 101 observations. Les résultats sont fournis dans le Tableau 5-3 ci-dessous.

Tableau 5-3 : Régression linéaire de la variation de rétro réflexion en considérant les données météorologiques du MTQ (101 enregistrements sur 192, R^2 ajusté de 0,873)

	coefficient	erreur std.	t de Student	p. critique	
const	-181,885	23,953	-7,593	<0,001	***
retroreflexion_init	0,688	0,037	18,720	<0,001	***
S_passages	0,190	0,046	4,118	<0,001	***
somme_abrasif	0,186	0,029	6,344	<0,001	***
somme_neige	-0,916	0,229	-3,997	<0,001	***
delta_date	-1,805	0,549	-3,285	0,001	***
nbre_J_gel_degel_Td	11,999	2,768	4,335	<0,001	***

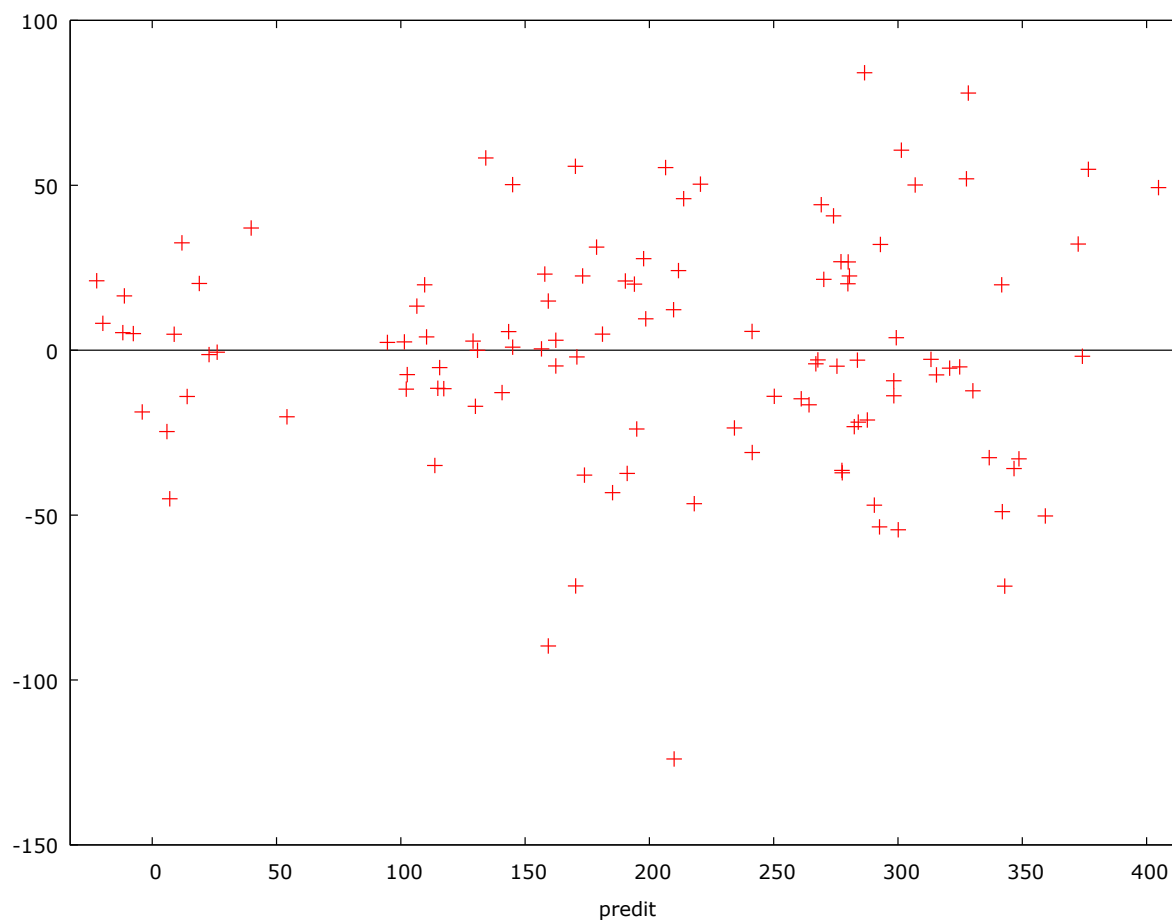


Figure 5-10 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la rétroréflexion en considérant les SMR

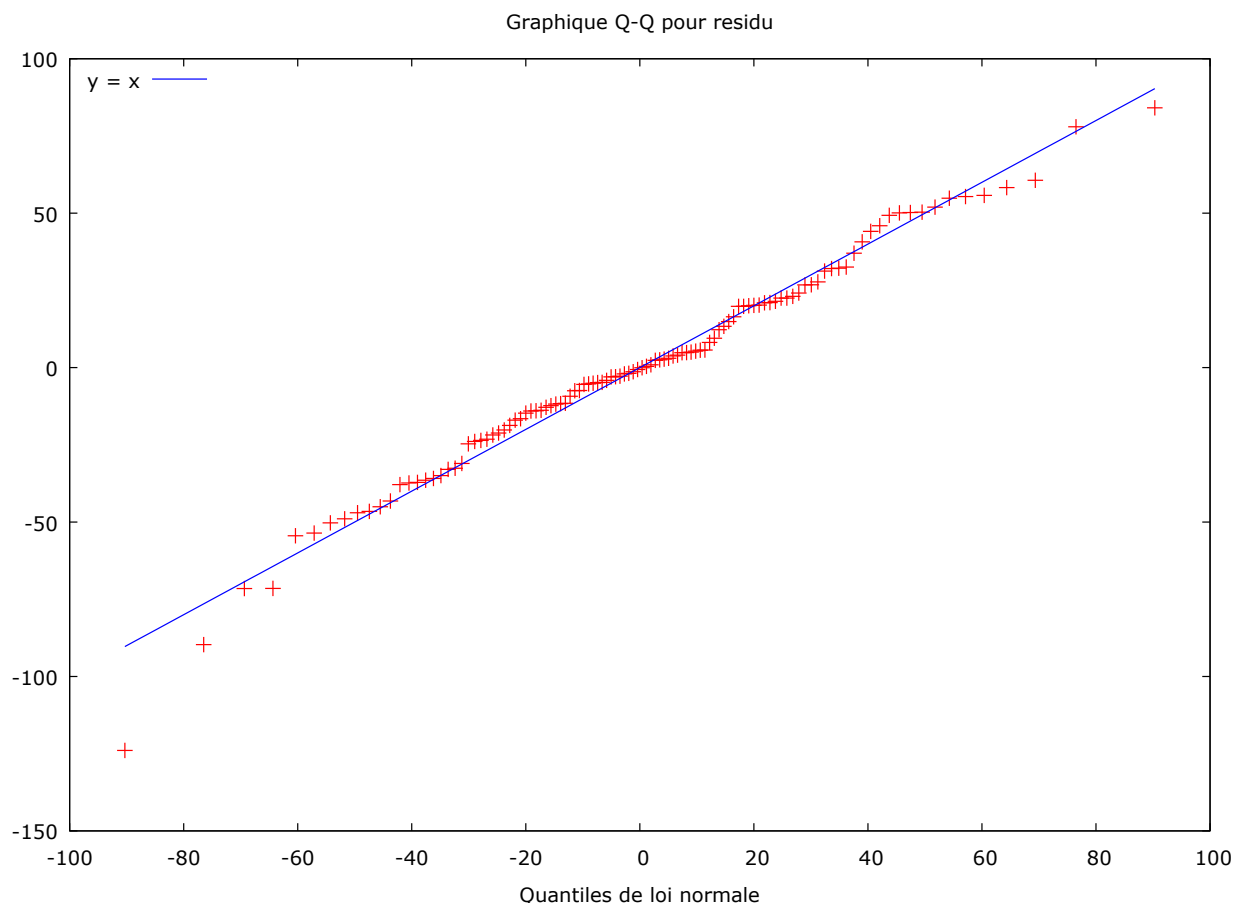


Figure 5-11 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la rétroréflexion en considérant les SMR

Encore une fois, le modèle réalisé répond à toutes les hypothèses (voir Figure 5-10 et Figure 5-11) et dispose d'un R^2 ajusté élevé. Comme pour le modèle précédent, la valeur de rétroréflexion initiale et le nombre de passages des déneigeuses sont significatifs. Le nombre de jours où il a gelé et dégelé vient prendre la place de l'écart-type de température, mais les variables étant très fortement corrélées, il est juste de dire que de façon générale, les indicateurs liés à la température sont significativement positifs pour la perte de rétroréflexion. Par contre, la quantité de neige tombée est devenue significative avec un coefficient de signe négatif, c'est-à-dire que les chutes de neige sont associées à des pertes plus faibles de rétroréflexion. Deux commentaires sont à faire à propos de ce changement de signe :

- Il s'agit dans un cas des relevés météorologiques des agents d'entretien (« somme_neige » qui correspond à la somme de la donnée « neige » sur la période d'agrégation), les valeurs sont

donc plus précises spatialement. Dans l'autre cas (« neige_tot »), il s'agit de données récupérées d'EC à parfois plus de 80 km du RTSS.

- Cela met en évidence la fragilité du modèle, dû au nombre d'enregistrements exploitables limité.

5.3.5 Modèles pour la durabilité

De même que pour la rétroreflexion, les données météorologiques du MTQ font l'objet d'un modèle restreint aux RTSS distants de moins de 100 km d'une des stations.

5.3.5.1 Modèle général

Le modèle retenu dans le cas de la durabilité est présenté dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Régression linéaire de la variation de durabilité (1141 enregistrements sur 1869, R^2 ajusté de 0,678)

	coefficient	erreur std.	t de Student	p. critique	
const	-19,897	1,543	-12,900	<0,001	***
durabilite_init	0,157	0,019	8,254	<0,001	***
S_passages	-0,016	0,003	-5,041	<0,001	***
y_moy	0,000	0,000	5,573	<0,001	***
somme_abrasif	0,008	0,000	24,520	<0,001	***
debit	0,000	0,000	17,730	<0,001	***
eau	2,088	0,794	2,629	0,009	***
nbre_J_delta_T_20	0,450	0,079	5,667	<0,001	***
nbre_J_gel_degel	0,187	0,030	6,251	<0,001	***
somme_neige	-0,033	0,008	-3,953	<0,001	***
age_revtm	0,302	0,053	5,730	<0,001	***

Le graphique des résidus et le diagramme Q-Q sont disponibles en Figure 5-12 et en Figure 5-13.

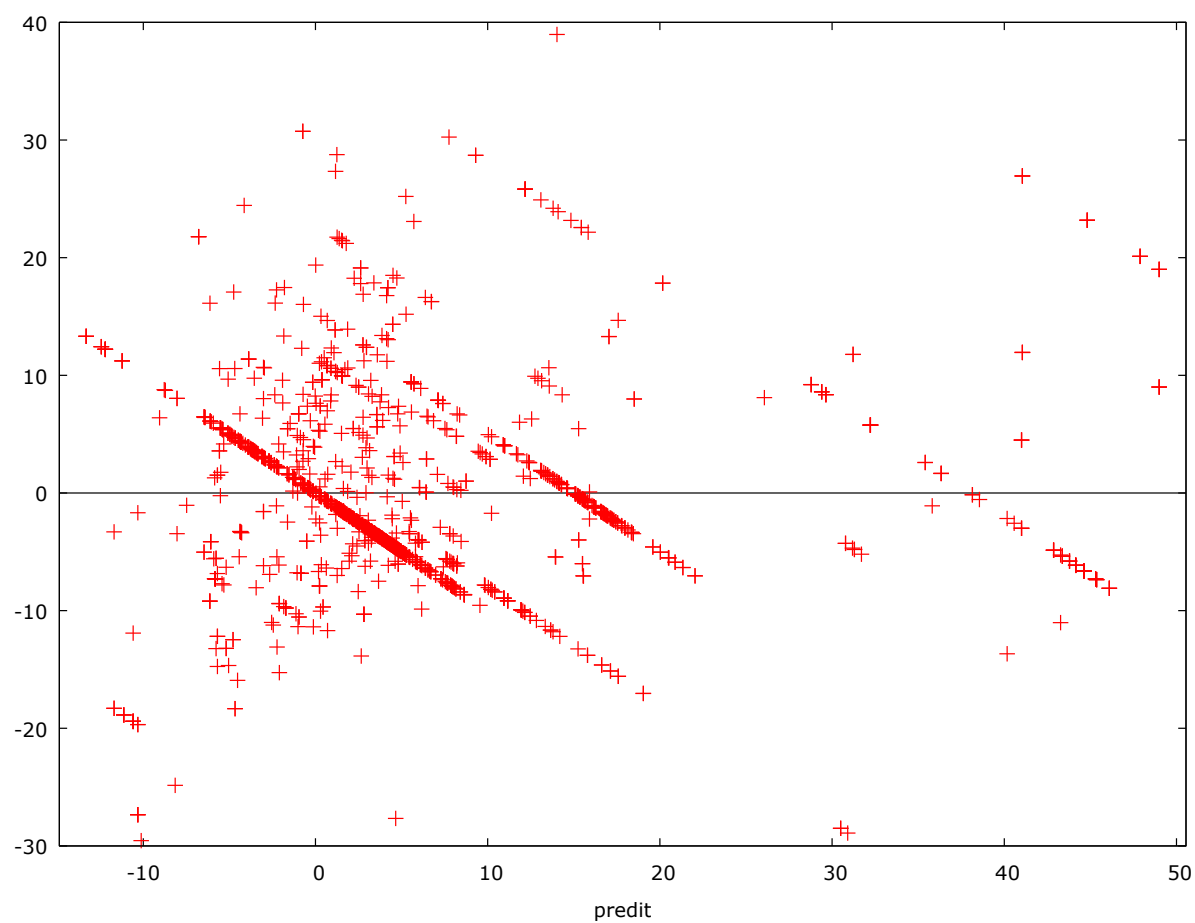


Figure 5-12 : Graphique des valeurs résiduelles en fonctions des valeurs prédites pour la durabilité

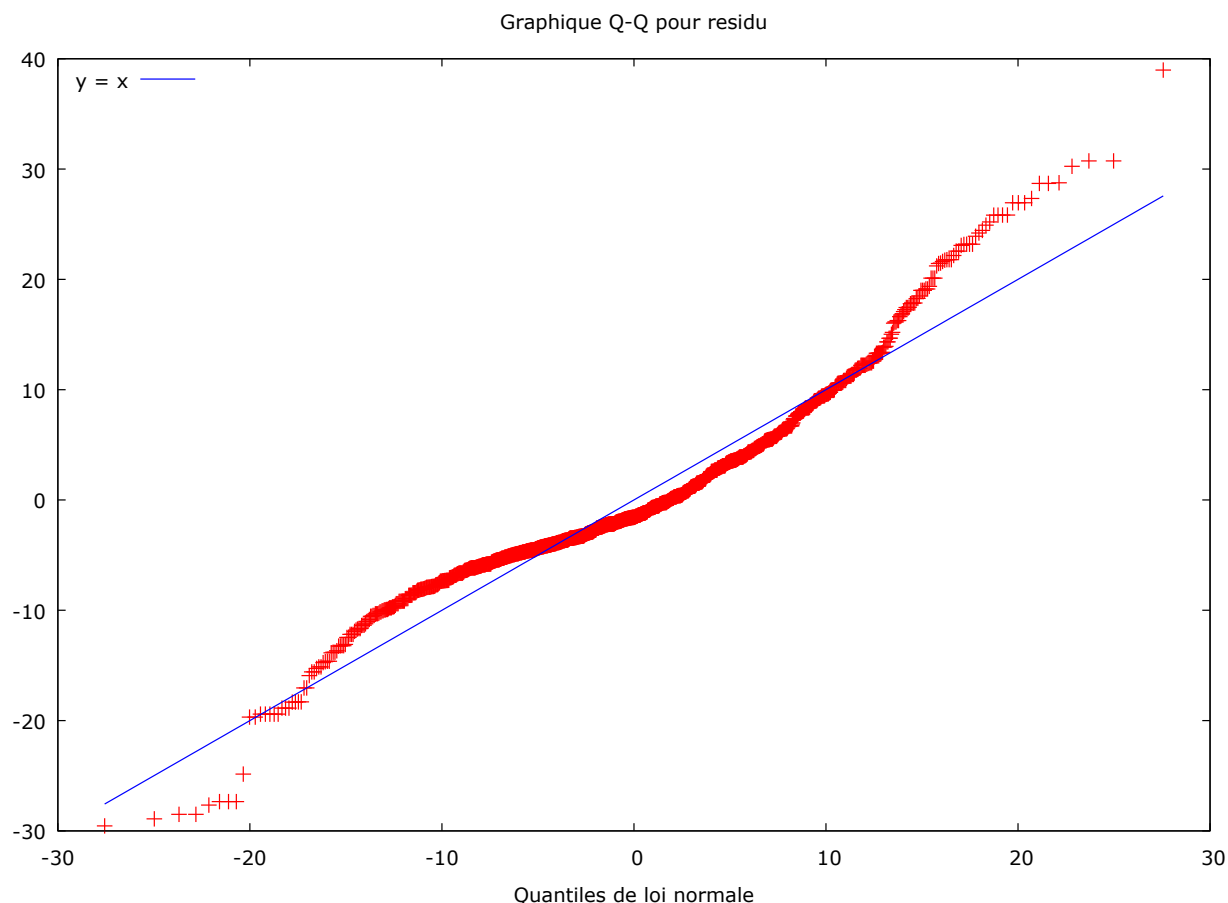


Figure 5-13 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la durabilité

Contrairement aux modèles de rétroréflexion, les hypothèses semblent ici impossibles à confirmer. Malgré sa disparité de part et d'autre de l'abscisse, les résidus semblent avoir une tendance décroissante, ce qui signifie que les résidus sont dépendants de variables exogènes (voir Figure 5-12). De plus, la Figure 5-13 sème un doute quant à la normalité des erreurs (ce qui est confirmé par des tests de normalité). Le modèle n'est pas aussi bon que pour la rétroréflexion puisque le R^2 ajusté n'est que de 0,678. Malgré tout, ce modèle est le meilleur obtenu après de très nombreuses itérations. Plus de 700 enregistrements ne sont pas considérés à cause des variables limitantes (indicateurs d'EC et du FMR en majorité).

Le modèle fait ressortir la durabilité initiale, la quantité d'abrasifs utilisés, le débit de véhicules, le nombre de jours où la variation de température a passé les 20°C, le nombre de jours où il a gelé et dégelé ainsi que l'âge du revêtement comme des facteurs de diminution de la durabilité du marquage. Tous ces résultats sont en concordance avec la littérature. Encore une fois, les marquages à l'eau sont plus impactés que les autres types de matériaux. Une nouveauté apparaît

par rapport aux modèles de rétroflexion : les routes semblent se dégrader plus au nord (« y_moy » positivement significatif dans le modèle). Par contre, deux variables significatives ont un effet qui semble contre-intuitif : la quantité de neige tombée et le nombre de passages de déneigeuses sont associées à des dégradations plus faibles du marquage.

5.3.5.2 Modèle restreint aux RTSS proches des stations météorologiques du MTQ

En considérant les stations météorologiques du MTQ, le modèle et les graphiques sont les suivants :

Tableau 5-5 : Régression linéaire de la variation de durabilité en considérant les données météorologiques du MTQ (322 enregistrements sur 1869, R^2 ajusté de 0,600)

	coefficient	erreur std.	t de Student	p. critique	
const	-31,602	4,425	-7,141	<0,001	***
durabilite_init	0,501	0,051	9,845	<0,001	***
S_passages	0,021	0,006	3,454	0,001	***
vit_max	-0,090	0,020	-4,602	<0,001	***
pluie_tot	0,016	0,003	6,163	<0,001	***
neige_tot	-0,039	0,007	-5,773	<0,001	***
deltas_Td_20	-0,038	0,018	-2,191	0,029	**

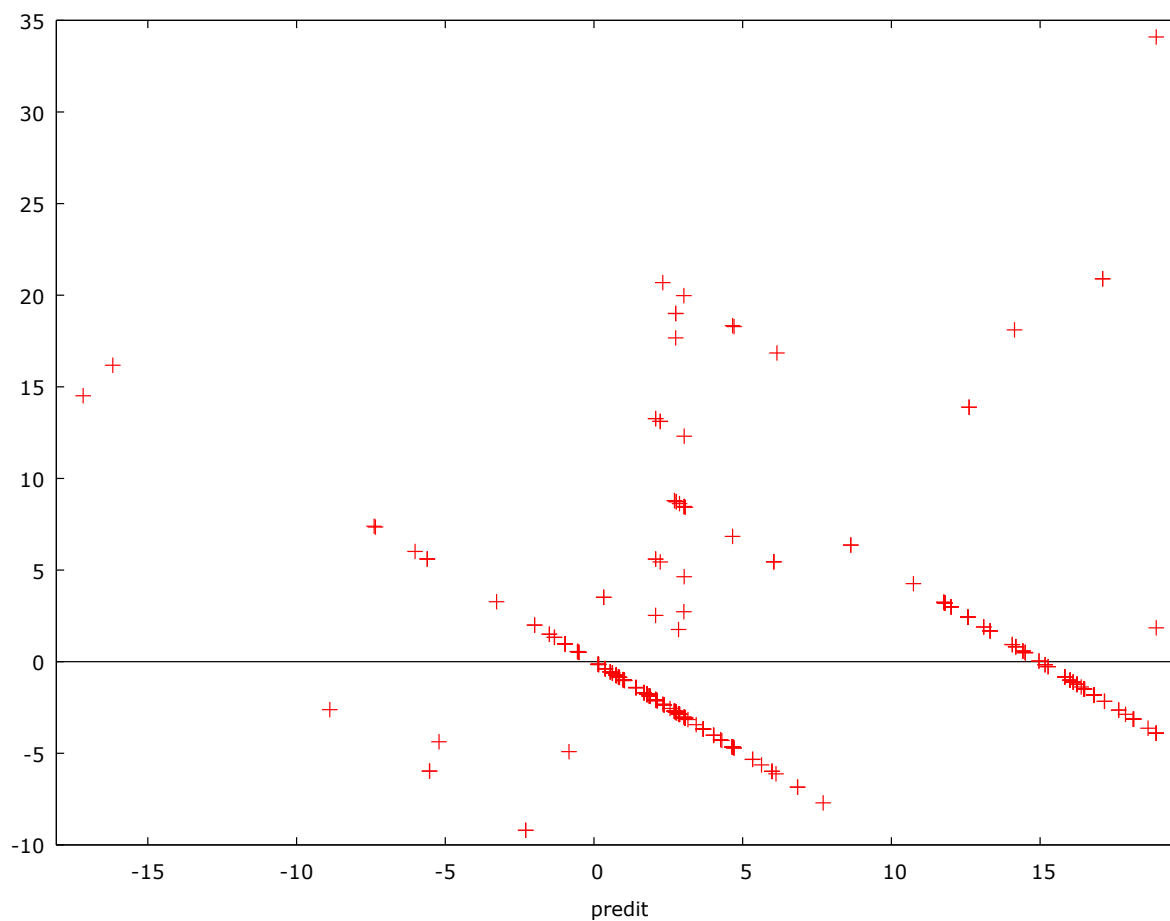


Figure 5-14 : Graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites pour la durabilité en considérant les SMR

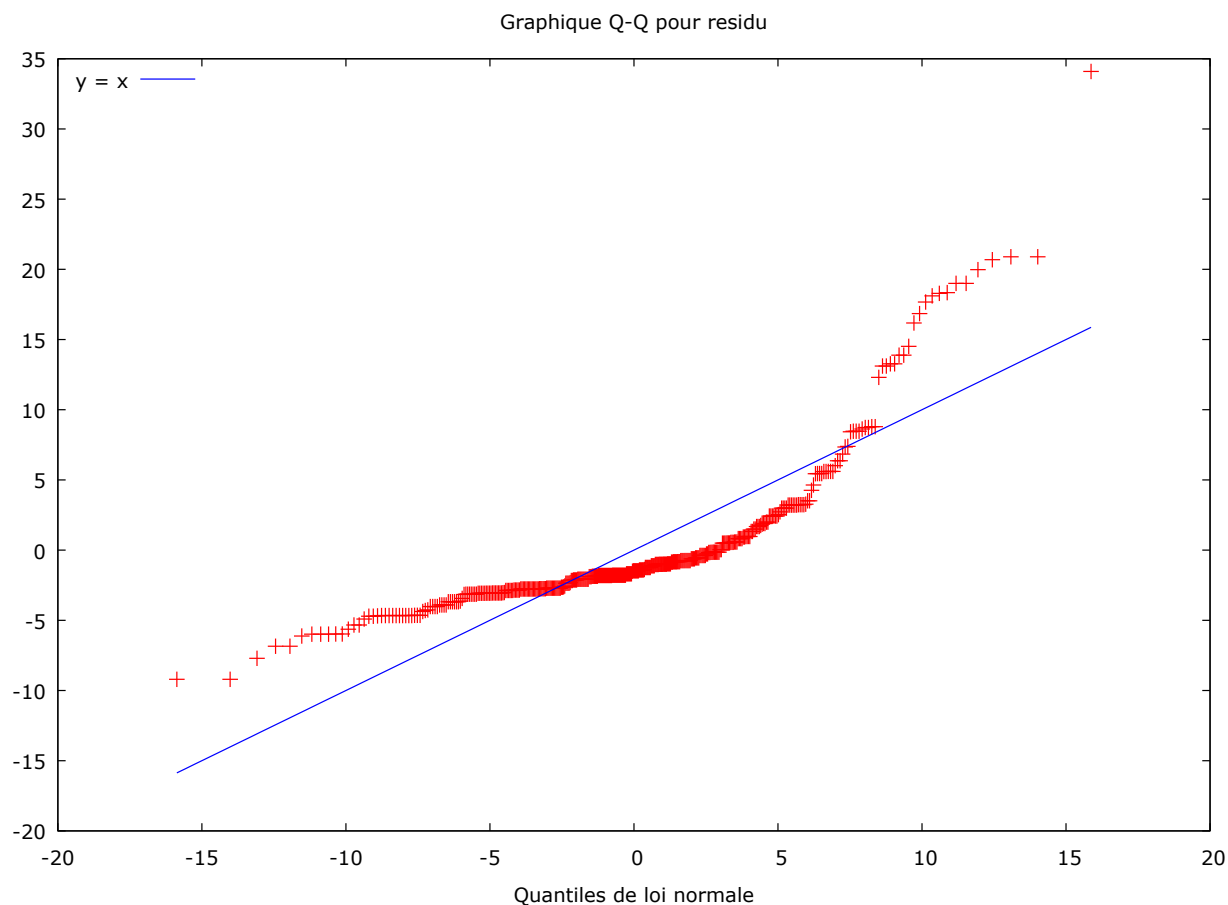


Figure 5-15 : Diagramme Q-Q des valeurs résiduelles pour la durabilité en considérant les SMR

La Figure 5-14 et la Figure 5-15 mènent aux mêmes conclusions que pour le modèle complet. En ce qui concerne les variables significatives ressortant de ce modèle (voir Tableau 5-5), les résultats sont encore une fois mitigés. La durabilité initiale continue à être associée positivement à la dégradation du marquage tandis que la quantité de neige tombée est une nouvelle fois associée à des dégradations plus faibles, même si c'est la variable d'EC qui ressort cette fois. Par contre, la quantité de passages des déneigeuses est significativement positive, comme il est naturel de le penser ; alors que le seul indicateur concernant les températures a un signe contre-intuitif. De même, la durabilité semble s'user moins lorsque la limite de vitesse augmente. La route étant plus droite si la vitesse est élevée, la question est de savoir si les usagers mordent moins la ligne parce que la route est plus facile à suivre ou la mordent plus puisqu'ils sont moins attentifs à cause de la monotonie du trajet en ligne droite.

5.4 Bilan des modèles de régression linéaire multiple

Au total, quatre modèles ont été retenus dans cette étude. Le Tableau 5-6 permet de les résumer et de le comparer.

Tableau 5-6 : Comparaison des différents modèles de régression linéaire multiple (+ (resp. -) signifie que la variable est significative de coefficient positif (resp. négatif))

	rétroréflexion complet	rétroréflexion restreint	durabilité complet	durabilité restreint
nombre d'enregistrements	136	101	1141	322
R ² ajusté	0,892	0,873	0,678	0,6
H5 vérifiée	oui	oui	non	non
H6 vérifiée	oui	oui	non	non
const	-	-	-	-
delta_date		-		
retro_init / durabilite_init	+	+	+	+
S_passages	+	+	-	+
somme_sel	-			
somme_abrasif		+	+	
neige_tot / somme_neige	+	-	-	-
pluie_tot	-			+
nbre_J_delta_T_20			+	
nbre_J_gel_degel			+	
nbre_J_gel_degel_Td		+		
deltas_Td_20				-
ecart_type_T	+			
ligne_mediane	-			
eau	+		+	
debit			+	
age_revtm			+	
vit_max				-
y_moy			+	

Au regard du tableau ci-dessus, voici les conclusions qui peuvent être tirées :

- Plus la durabilité et la rétroréflexion initiale sont élevés et plus le marquage (la durabilité et la rétroréflexion) se dégrade ;
- La quantité d'abrasif utilisée est significative dans la perte de rétroréflexion et de durabilité ;
- Les marquages à base de peinture à l'eau s'usent plus vite que les autres matériaux ;

- Les activités de déneigement sont globalement destructives pour le marquage au sol (exception pour un modèle de durabilité) ;
- La neige tombée en abondance pourrait diminuer la dégradation du marquage selon un mécanisme qui reste à identifier ;
- Le nombre de gels/dégels a un effet sur la dégradation du marquage.

Certains paramètres ne sont significatifs que pour un seul facteur de dégradation. C'est le cas de l'écart-type de la température qui est significativement positif pour la rétroréflexion, ainsi que le débit de véhicules, l'âge du revêtement et la latitude des routes pour la durabilité du marquage.

Enfin, d'autres variables posent des problèmes d'interprétation. La quantité de pluie et les variations de températures de plus de 20°C dans une même journée apparaissent simultanément significativement positives et significativement négatives, ce qui rend leur interprétation impossible pour les deux indicateurs. Bien que n'apparaissant que dans un modèle sur quatre, la quantité de sel et le nombre de jours entre deux mesures semblent favoriser la conservation de la rétroréflexion du marquage, de même que pour la vitesse maximale autorisée pour la durabilité. La ligne médiane, qui semblerait être plus sollicitée que les lignes de rive par les usagers (lors des dépassements par exemple) ou par les déneigeuses (à l'aller et au retour), ressort comme étant celle qui perd le moins de rétroréflexion.

Il faut prendre un peu de recul quant aux résultats et interprétations des analyses. Les origines diverses des données et les manipulations des tables pour pouvoir les lier entre elles ont fait que le nombre d'enregistrements complets (c'est-à-dire avec une valeur pour chacune des variables) est faible. Les modèles sont donc dotés d'un faible nombre d'observations par rapport au nombre total disponible, ce qui diminue leur stabilité. En effet, dans le cas présent, la méthode de la régression linéaire multiple permet de déterminer les interrelations entre les différents indicateurs mais avec un faible nombre d'enregistrement, l'ajout ou le retrait d'un paramètre peut complètement modifier le résultat. De nombreuses itérations ont été faites pour arriver aux quatre modèles présentés plus haut, mais le nombre élevé de variables explicatives potentielles fait que toutes les possibilités n'ont pas nécessairement été étudiées. Il se peut qu'un modèle de meilleure qualité et répondant mieux aux hypothèses existe.

Chapitre 6 CONCLUSION

6.1 Contributions

L'objectif de ce projet effectué en collaboration avec le ministère des transports du Québec était de déterminer les facteurs de perte de qualité des marquages routiers au sol à travers deux mesures : la durabilité et la rétroréflexion.

Les études antérieures à ce projet mettent en lumière trois grandes catégories de paramètres pouvant dégrader les lignes : les caractéristiques de la chaussée, les caractéristiques du trafic et l'environnement. Peu de projets ont étudié l'impact de l'entretien hivernal à cause de la difficulté à obtenir des informations concernant le déneigement et l'épandage. Un effort particulier a donc été fourni pour intégrer ces informations ainsi que les données météorologiques. Les bases de données du ministère ont permis de disposer de beaucoup d'informations sur les caractéristiques de la route et de la circulation. Les campagnes de mesures de rétroréflexion et de durabilité sont la base de ce projet.

Fort de ces informations, une base de données a été construite pour mettre en lien toutes les données à disposition. La plus grande partie du travail a consisté à mettre en forme les données pour construire cette base, dans le but d'avoir un maximum d'indicateurs pour expliquer les variations de durabilité et de rétroréflexion. Pour cela, deux logiciels ont été utilisés :

- Microsoft Access, pour créer des requêtes et mettre en relation les paramètres.
- le langage Python, pour télécharger les données météorologiques, calculer des indicateurs et générer les fichiers d'agrégation des données.

Pour finir, le logiciel Gretl a été choisi pour estimer des modèles de régression linéaire multiple pour capter les interrelations entre les paramètres à disposition pouvant influencer la qualité du marquage.

6.2 Résultats

Après de nombreuses itérations dans le but de tester tous les indicateurs et de trouver le modèle le plus juste et le plus stable possible, le premier constat est que les pertes de rétroréflexion et de durabilité sont non linéaires car leur valeur initiale est significativement positive dans tous les

modèles. Il apparaît aussi que les trois grandes catégories de facteurs identifiées dans la littérature jouent un rôle dans la dégradation du marquage.

Pour les caractéristiques de la route, c'est surtout le type de matériau utilisé pour le marquage qui ressort de l'analyse. La peinture à l'eau, moins coûteuse, se détériore très vite en termes de durabilité et de rétroréflexion. L'âge du revêtement et la latitude de la route sont aussi des facteurs de diminution de la durabilité.

Les conclusions sont plus difficiles pour la circulation. Le débit de voitures semble impacter la durabilité du marquage.

Pour ce qui est de l'environnement, les variations de température entraînant du gel et du dégel dans une même journée semblent liées à la dégradation du marquage, tandis que les chutes de neige semblent protectrices.

Une attention particulière doit être portée sur l'entretien hivernal puisque les abrasifs utilisés pour améliorer l'adhérence des véhicules détériorent le marquage. De même, le passage des déneigeuses avec les lames au sol semble jouer un rôle clé dans la perte de qualité du marquage. Par contre, le sel semble le protéger, ce qui n'est pas attendu.

6.3 Limites de l'analyse

Les résultats des analyses doivent être attentivement analysés, car le peu d'enregistrements complets font que les modèles de régression sont très sensibles à l'ajout où le retrait d'indicateur. Cela s'explique de plusieurs façons :

- Seulement deux relevés de rétroréflexion par RTSS ont été faits : un avant et un après l'hiver. Cela ne permet de calculer qu'une seule variation par RTSS.
- Parmi les 31 circuits recensés pour l'étude, seulement 23 ont été exploités car les données de certains d'entre eux n'ont pas été collectées dans un format utilisable ou présentaient des éléments manquants.
- Les indicateurs météorologiques calculés à partir des données fournies par le ministère ne concernaient que quatre stations, il a donc fallu se restreindre aux RTSS suffisamment proches pour ne pas biaiser les résultats impliquant ces indicateurs.

D'autre part, certaines données ont dû être simplifiées. C'est le cas des types de lignes où de nombreux ajustements ont dû être faits pour bien les distinguer. Les codages lors de la collecte de rétroreflexion, de durabilité et de l'entretien hivernal étaient tous trois différents, ce qui a nécessité des simplifications pour pouvoir tout associer.

Enfin, le modèle permettant d'avoir un R^2 ajusté le plus élevé possible tout en garantissant le respect des hypothèses du modèle n'est pas garanti. Les modèles présentés ont été trouvés après de très nombreuses itérations, mais un meilleur modèle peut exister.

6.4 Perspectives d'amélioration

Il est possible d'améliorer la qualité des données de l'entretien hivernal en changeant la façon de les récolter. Par exemple, il serait intéressant de créer un formulaire à remplir en ligne qui permettrait à la fois d'avoir les données sous le bon format et d'automatiser le remplissage de la base de données. Aussi, la collecte de données devrait se faire sur plus d'une année sans repeinte pour avoir plus d'observations.

Seul le modèle de régression linéaire a été exploité dans ce projet. Celui-ci ne permet pas de voir des corrélations plus complexes (sous forme quadratique ou exponentielle par exemple), ni d'interactions entre variables. La littérature laisse penser que les modèles en exponentiel négatif ou quadratique de la dégradation en fonction du temps auraient pu être utilisés. D'autre part, les modèles prédictifs tels que les réseaux de neurones permettraient aussi de déterminer la perte de durabilité ou de rétroreflexion en fonction des autres paramètres.

BIBLIOGRAPHIE

- Agent, K. R., & Green, E. R. (2009). Evaluation of the Use of Snowplowable Raised Pavement Markers.
- Asdrubali, F., Buratti, C., Moretti, E., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2013). Assessment of the Performance of Road Markings in Urban Areas: The Outcomes of the CIVITAS RENAISSANCE Project. *Open Transportation Journal*, 7.
- Bahar, G., Masliah, M., Erwin, T., Tan, E., & Hauer, E. (2006). Pavement marking materials and markers: Real-world relationship between retroreflectivity and safety over time.
- Bahar, G. B. (2004). *Safety evaluation of permanent raised pavement markers*. Transportation Research Board, NCHRP Report 518.
- Boily, F., & Tremblay, M. (2014). *Guide sur la rétroréflexion du mrquage routier (Principes et évaluation)*.
- Carlson, P. J., Park, E. S., & Andersen, C. K. (2009). Benefits of Pavement Markings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2107(1), 59-68.
- Cottrell Jr, B. (1995). INVESTIGATION OF THE IMPACT OF SNOW REMOVAL ACTIVITIES ON PAVEMENT MARKINGS IN VIRGINIA. FINAL REPORT.
- Cuelho, E., Stephens, J., & McDonald, C. (2003). A Review of the Performance and Costs of Contemporary Pavement Marking Systems.
- Donnell, E. T., Karwa, V., & Sasidharan, L. (2009). Retroreflectivity Database Study: Pennsylvania Department of Transportation.
- Donnell, E. T., Karwa, V., & Sathyanarayanan, S. (2009). Analysis of effects of pavement marking retroreflectivity on traffic crash frequency on highways in North Carolina. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2103(1), 50-60.
- Elwakil, E., Eweda, A., & Zayed, T. (2014). Modelling the effect of various factors on the condition of pavement marking. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(1), 93-105.
- FHWA. (2010). *Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*.
- Fu, H., & Wilmot, C. G. (2008). Assessing performance of alternative pavement marking materials: Louisiana Department of Transportation and Development, Louisiana Transportation Research Center.
- Gates, T. J., Hawkins, H. G., & Rose, E. R. (2003). Effective Pavement Marking Materials and Applications for Portland Cement Concrete Roadways: Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.
- Hawkins Jr, H., Gates, T., & Rose, E. (2004). Pavement Marking Handbook: Product. 0-4150-P1. Texas Transportation Institute, College Station, Tex.

- Hirasawa, M., Kotera, S., Asano, M., & Aita, H. (2010). *Development of Recessed Pavement Markings that Incorporate Rumble Strips*. Paper presented at the Transportation Research Board 87th Annual Meeting.
- Hollingsworth, J. D. (2012). Understanding the Impact of Bead Type on Paint and Thermoplastic Pavement Markings: DTIC Document.
- Jiang, Y. (2008). Durability and retro-reflectivity of pavement markings (synthesis study). *Joint Transportation Research Program*, 235.
- Karwa, V., & Donnell, E. T. (2011). Predicting pavement marking retroreflectivity using artificial neural networks: Exploratory analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 137(2), 91-103.
- Kubas, A., Kayabas, P., Vachal, K., & Berwick, M. (2013). Rumble Strips in North Dakota: A Comparison of Road Segments, Safety, and Crash Patterns. *North Dakota Department of Transportation*.
- LADWA. (2009). Reflective Road Studs <http://www.ladwasafety.com/products/safety-road-studs.php>.
- Lynde, M. (2006). Evaluation of Inlaid Durable Pavement Markings in an Oregon Snow Zone.
- Maurer, G., & Bemanian, S. (2005). Advancing Durable Pavement Marking Materials in Nevada.
- Migletz, J., Graham, J. L., Harwood, D. W., & Bauer, K. M. (2001). Service life of durable pavement markings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1749(1), 13-21.
- Ministère des Transports du Québec. (2002). *Guide de la codification et du mesurage du réseau routier*.
- Mitkey, S. R., Brennan, T., Davis, A., Grimmer, G., Hainen, A., Morris, R., & Michael, P. (2011). Retroreflectivity Durability Comparison of Rumble Stripes vs. Painted Line. *Purdue University*, November.
- Monfette, M. L. (2011). Impact of Snow Removal Operations on Thermoplastic Pavement Markings: DTIC Document.
- Montebello, D., & Schroeder, J. (2000). Cost of pavement marking materials.
- Mull, D. M., & Sitzabee, W. E. (2011). Paint Pavement Marking Performance Prediction Model. *Journal of Transportation Engineering*, 138(5), 618-624.
- Outcalt, W. (2004). Recessed Striping in Concrete Pavement.
- Reynolds, T., & Hawkins Jr, H. (2010). *The Impact of Snowplowing and Traffic on Marking Retroreflectivity in New Hampshire*. Paper presented at the Transportation Research Board 89th Annual Meeting.
- Roosevelt, D. S., & Cottrell Jr, B. (1997). Evaluation of Urethane and Carbide-tipped Blades on Wheel-supported Snow Plows.
- Rumar, K. (1998). Lane markings in night driving: A review of past research and of the present situation.

- Sadid, H., Wabrek, R. M., & Dongare, S. (2010). Materials Acceptance Risk Analysis: Pavement Markings.
- Sathyanarayanan, S. (2007). *Semi-parametric Modeling of Pavement Marking Visibility Degradation*. The Pennsylvania State University.
- Saunier, N., Brosseau, M., & Carrasquilla, A. (2012). Revue de littérature et recensement auprès des administrations voisines sur l'existence d'une problématique de rétro réflexion et sur les moyens mis en place pour assurer une rétro réflexion d'une durée supérieure à une année (pp. 90): École Polytechnique de Montréal.
- Saunier, N., Lacoffe, A., Bourdeau, J.-S., & Trépanier, M. (2014). Projet de recherche portant sur les interrelations des principaux facteurs influençant ou pouvant influencer la qualité du marquage (durabilité et rétro réflexion) (pp. 70): École Polytechnique Montréal.
- Shahata, K., Fares, H., Zayed, T., Abdelrahman, M., & Chughtai, F. (2008). *Condition rating models for sustainable pavement marking*. Paper presented at the Transportation Research Board 87th Annual Meeting.
- Smadi, O., Souleyrette, R. R., Ormand, D. J., & Hawkins, N. (2008). Pavement marking retroreflectivity: Analysis of safety effectiveness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2056(1), 17-24.
- Thamizharasan, A., Sarasua, W. A., Clarke, D. B., & Davis, W. J. (2003). *A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity*. Paper presented at the Proceedings of the Transportation Research Board 82nd Annual Meeting, Washington, DC, CR-ROM, Paper.
- Tremblay, M. (2004). *A New Approach to the Management of Pavement Markings in Quebec. Nouvelle approche de gestion de la signalisation horizontale au Quebec*. Paper presented at the 2004 CONGRES ET EXPOSITION ANNUELS DE L'ASSOCIATION DES TRANSPORTS DU CANADA.
- Tremblay, M. (2008). *État des connaissances sur les peintures à base d'eau pour le marquage routier* Paper presented at the Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes 2008.
- Tremblay, M., & Boily, F. (2011). *Problématiques d'arrachement des produits de marquage à base de résine époxydique (époxy)*. Paper presented at the Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes, Montréal.
- Wikipédia. (2014a). comma-separated-value. Retrieved 06/06/2014, 2014, from http://fr.wikipedia.org/wiki/Comma-separated_values
- Wikipédia. (2014b). Signalisation routière horizontale. Retrieved 09/06/2014, 2014, from http://fr.wikipedia.org/wiki/Marquage_au_sol
- Zhang, G., Hummer, J. E., & Rasdorf, W. (2009). Impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity. *Journal of Transportation Engineering*, 136(8), 773-781.

ANNEXES

ANNEXE A – Codification des mesures de rétroréflexion (en orange) et de durabilité (en vert) en fonction du type de chaussée

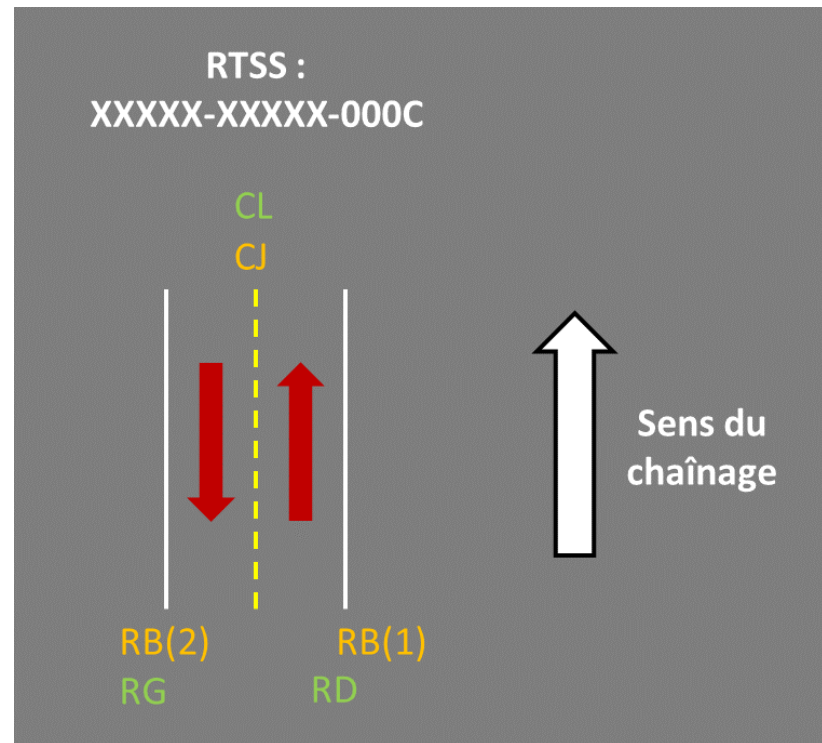


Figure 6-1 : Cas des chaussées contiguës à une voie par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR », 1 et 2 correspondent

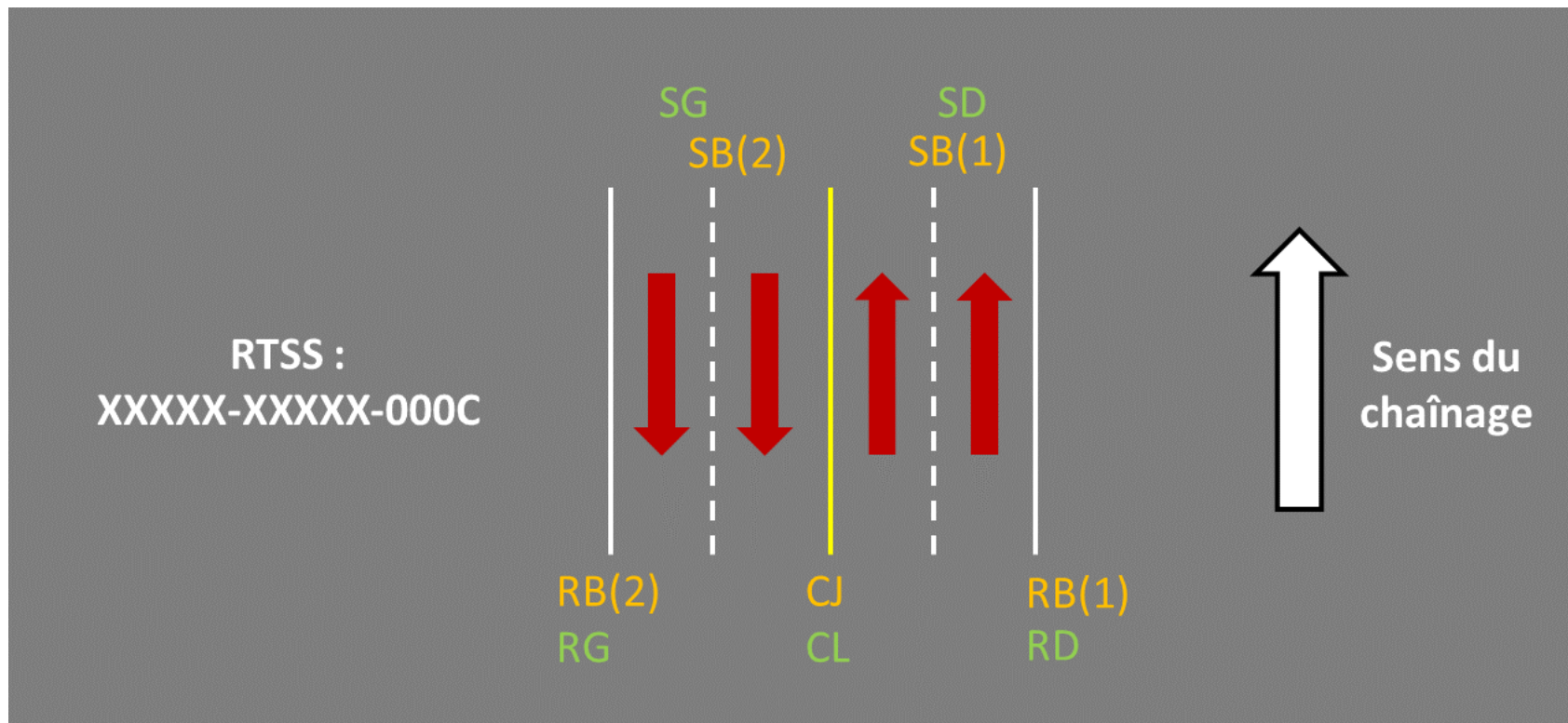


Figure 6-2 : Cas des chaussées contiguës à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR », 1 et 2 correspondent

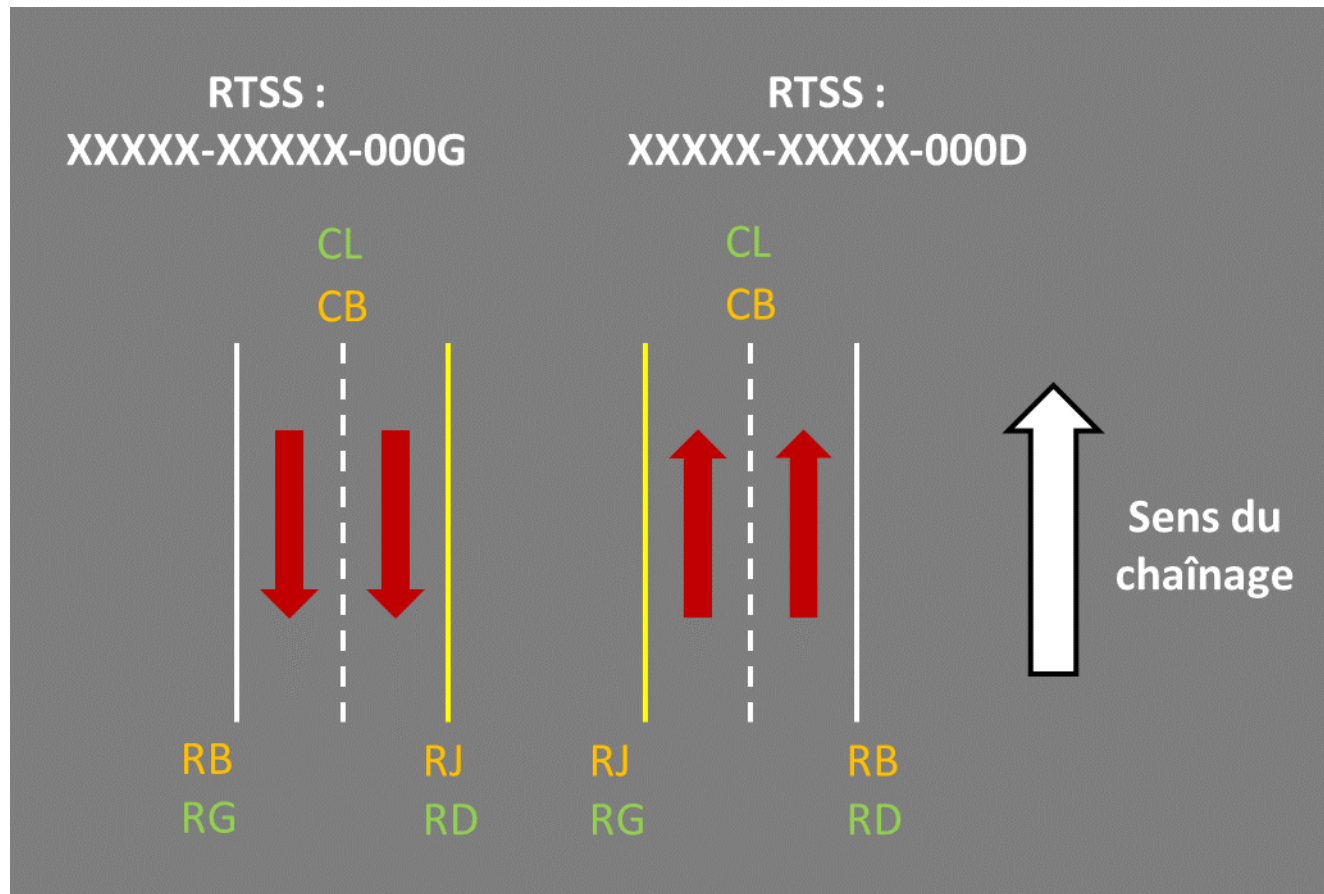


Figure 6-3 : Cas des chaussées séparées à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR ».

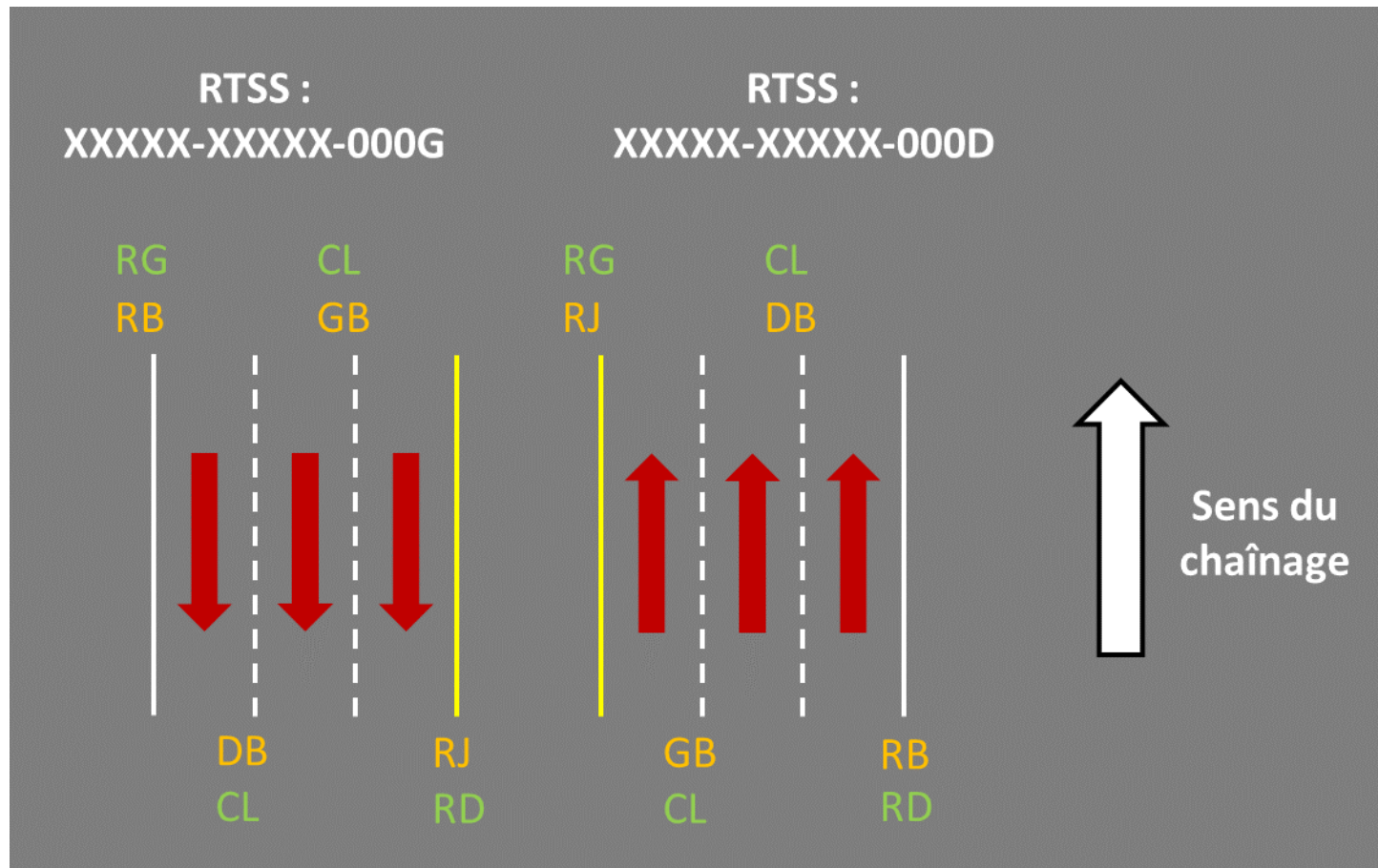


Figure 6-4 : Cas des chaussées séparées à 2 voies par sens de circulation. Le code pour la durabilité correspond aux 2 dernières lettres des champs « ETAT_MARQUAGE_XX » et celui de la rétroréflexion aux 4ème et 5ème lettres du « NOM_FICHR ».

ANNEXE B – Matrices de corrélation des différents jeux de données utilisés dans l'étude

La légende de la Figure 6-5 à la Figure 6-11 est la suivante :



	delta_durab	durab_init	delta_date	nbre_J_T_negatif	nbre_J_gel_degel	nbre_J_delta_T20	nbre_J_delta_T15	nbre_J_delta_T10	nbre_J_delta_T5	nbre_J_gel_consec	pluie_tot	neige_tot	neigeEC_50cm	ecart_type_T
delta_durab	1,0	0,6	0,6	0,6	0,5	0,2	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6
durab_init	0,6	1,0	0,6	0,6	0,6	0,3	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6
delta_date	0,6	0,6	1,0	0,9	0,9	0,5	0,7	0,9	1,0	0,8	0,8	0,6	0,5	0,9
nbre_J_T_negatif	0,6	0,6	0,9	1,0	0,8	0,4	0,5	0,8	0,8	0,9	0,6	0,7	0,5	0,9
nbre_J_gel_degel	0,5	0,6	0,9	0,8	1,0	0,6	0,7	0,9	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3	0,8
nbre_J_delta_T20	0,2	0,3	0,5	0,4	0,6	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5
nbre_J_delta_T15	0,5	0,4	0,7	0,5	0,7	0,9	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,7
nbre_J_delta_T10	0,6	0,6	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8	1,0	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,9
nbre_J_delta_T5	0,6	0,6	1,0	0,8	0,9	0,5	0,7	1,0	1,0	0,8	0,8	0,5	0,4	0,9
nbre_J_gel_consec	0,5	0,5	0,8	0,9	0,7	0,5	0,6	0,8	0,8	1,0	0,6	0,6	0,6	0,9
pluie_tot	0,5	0,5	0,8	0,6	0,6	0,4	0,5	0,7	0,8	0,6	1,0	0,7	0,6	0,7
neige_tot	0,4	0,4	0,6	0,7	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	1,0	0,9	0,6
neigeEC_50cm	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,9	1,0	0,5
ecart_type_T	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	0,5	1,0

Figure 6-5 : Matrice des corrélations des données météorologiques d'EC pour la durabilité

	delta_retro	retro_init	delta_date	nbre_J_T_negatif	nbre_J_gel_degel	nbre_J_delta_T20	nbre_J_delta_T15	nbre_J_delta_T10	nbre_J_delta_T5	nbre_J_gel_consec	pluie_tot	neige_tot	neigeEC_50cm	ecart_type_T
delta_retro	1,0	0,9	-0,3	0,2	-0,1	0,0	-0,2	-0,5	-0,5	0,2	-0,3	0,3	0,2	-0,4
retro_init	0,9	1,0	-0,4	0,0	-0,1	0,1	-0,1	-0,5	-0,5	0,1	-0,3	0,2	0,1	-0,5
delta_date	-0,3	-0,4	1,0	0,6	0,7	0,0	0,3	0,8	0,9	0,5	0,5	0,0	0,1	1,0
nbre_J_T_negatif	0,2	0,0	0,6	1,0	0,7	0,1	0,2	0,4	0,5	0,9	0,2	0,3	0,3	0,6
nbre_J_gel_degel	-0,1	-0,1	0,7	0,7	1,0	0,3	0,5	0,7	0,8	0,7	0,0	-0,4	-0,2	0,7
nbre_J_delta_T20	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	1,0	0,8	0,4	0,1	0,3	0,1	0,0	-0,1	0,1
nbre_J_delta_T15	-0,2	-0,1	0,3	0,2	0,5	0,8	1,0	0,7	0,4	0,3	0,4	-0,1	-0,1	0,4
nbre_J_delta_T10	-0,5	-0,5	0,8	0,4	0,7	0,4	0,7	1,0	0,9	0,3	0,5	-0,2	-0,1	0,9
nbre_J_delta_T5	-0,5	-0,5	0,9	0,5	0,8	0,1	0,4	0,9	1,0	0,4	0,4	-0,2	-0,1	0,9
nbre_J_gel_consec	0,2	0,1	0,5	0,9	0,7	0,3	0,3	0,3	0,4	1,0	0,0	0,1	0,1	0,4
pluie_tot	-0,3	-0,3	0,5	0,2	0,0	0,1	0,4	0,5	0,4	0,0	1,0	0,6	0,5	0,5
neige_tot	0,3	0,2	0,0	0,3	-0,4	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	0,1	0,6	1,0	0,9	0,0
neigeEC__50cm	0,2	0,1	0,1	0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,5	0,9	1,0	0,0
ecart_type_T	-0,4	-0,5	1,0	0,6	0,7	0,1	0,4	0,9	0,9	0,4	0,5	0,0	0,0	1,0

Figure 6-6 : Matrice des corrélations des données météorologiques d'EC pour la rétroréflexion

	delta_durab	durab_init	delta_date	debit	debit_camions	autoroute	nationale	regionale	rigide	souple	mixte	urbain	rural	suburbain	exigence1A	exigence1B	exigence2A	exigence2B	exigence3	vit_max
delta_durab	1,0	0,6	0,6	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
durab_init	0,6	1,0	0,6	0,2	0,5	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,3	0,3	0,0	-0,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0
delta_date	0,6	0,6	1,0	0,4	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0
debit	0,5	0,2	0,4	1,0	0,8	0,3	-0,2	-0,1	0,2	-0,4	0,4	0,3	-0,3	0,0	0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
debit_camions	0,4	0,5	0,8	0,8	1,0	0,3	-0,3	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,2
autoroute	0,0	-0,1	0,0	0,3	0,3	1,0	-0,8	-0,4	0,1	-0,3	0,2	0,2	-0,2	0,0	0,4	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,4
nationale	0,0	0,1	0,0	-0,2	-0,3	-0,8	1,0	-0,3	-0,1	0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,3
regionale	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,4	-0,3	1,0	-0,1	0,1	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	-0,2	0,0	0,3	0,1	0,0	-0,2
rigide	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	-0,1	-0,1	1,0	-0,5	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,1
souple	0,0	0,1	0,1	-0,4	0,0	-0,3	0,2	0,1	-0,5	1,0	-0,8	-0,4	0,4	0,0	-0,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,2
mixte	0,0	-0,1	-0,1	0,4	0,0	0,2	-0,2	-0,1	0,0	-0,8	1,0	0,3	-0,3	0,0	0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,0	-0,3
urbain	0,0	-0,3	-0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	-0,2	0,2	-0,4	0,3	1,0	-0,9	-0,1	0,4	-0,2	-0,2	0,0	-0,1	-0,3
rural	0,0	0,3	0,1	-0,3	0,0	-0,2	0,0	0,2	-0,2	0,4	-0,3	-0,9	1,0	-0,3	-0,4	0,2	0,2	0,0	0,1	0,3
suburbain	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,3	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
exigence1A	0,0	-0,4	-0,1	0,3	0,1	0,4	-0,2	-0,2	0,2	-0,4	0,4	0,4	-0,4	0,0	1,0	-0,7	-0,2	-0,1	0,0	0,1
exigence1B	0,0	0,3	0,1	-0,2	0,0	-0,1	0,1	0,0	-0,2	0,3	-0,3	-0,2	0,2	0,0	-0,7	1,0	-0,4	-0,3	-0,1	0,0
exigence2A	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,3	0,1	0,3	0,0	0,1	-0,1	-0,2	0,2	0,0	-0,2	-0,4	1,0	-0,1	0,0	0,0
exigence2B	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,1	1,0	0,0	-0,2
exigence3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	1,0	0,0
vit_max	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,2	0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,2	-0,3	-0,3	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,2	0,0	1,0

Figure 6-7 : Matrice des corrélations des données du FMR pour la durabilité

	delta_retro	retro_init	delta_date	debit	debit_camions	autoroute	nationale	regionale	rigide	souple	mixte	urbain	rural	suburbain	exigence1A	exigence1B	exigence2A	vit_max
delta_retro	1,0	0,9	-0,3	-0,3	0,3	0,3	-0,4	0,1	0,0	0,2	-0,3	-0,3	0,3	0,0	-0,2	0,3	-0,1	0,3
retro_init	0,9	1,0	-0,4	-0,2	0,2	0,3	-0,4	0,1	0,1	0,2	-0,3	-0,4	0,4	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,4
delta_date	-0,3	-0,4	1,0	0,4	0,1	-0,2	0,4	-0,1	0,2	-0,2	0,1	0,5	-0,4	-0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2
debit	-0,3	-0,2	0,4	1,0	0,7	0,2	-0,1	-0,2	0,4	-0,8	0,7	0,6	-0,5	0,0	0,5	-0,3	-0,1	-0,2
debit_camions	0,3	0,2	0,1	0,7	1,0	0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	-0,3	0,0	0,1	0,1	-0,3	0,4
autoroute	0,3	0,3	-0,2	0,2	0,5	1,0	-0,6	-0,6	0,1	-0,2	0,2	0,0	0,0	-0,1	0,4	-0,1	-0,4	0,6
nationale	-0,4	-0,4	0,4	-0,1	-0,4	-0,6	1,0	-0,3	-0,1	0,1	-0,1	0,2	-0,3	0,1	-0,3	0,2	0,1	-0,4
regionale	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,6	-0,3	1,0	-0,1	0,1	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	-0,2	0,0	0,3	-0,3
rigide	0,0	0,1	0,2	0,4	0,0	0,1	-0,1	-0,1	1,0	-0,5	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,2	-0,2	0,0	0,1
souple	0,2	0,2	-0,2	-0,8	0,0	-0,2	0,1	0,1	-0,5	1,0	-0,9	-0,5	0,4	0,0	-0,5	0,4	0,1	0,3
mixte	-0,3	-0,3	0,1	0,7	0,0	0,2	-0,1	-0,1	0,0	-0,9	1,0	0,4	-0,4	0,0	0,4	-0,3	-0,1	-0,3
urbain	-0,3	-0,4	0,5	0,6	0,3	0,0	0,2	-0,2	0,2	-0,5	0,4	1,0	-0,9	-0,1	0,2	-0,1	-0,2	-0,3
rural	0,3	0,4	-0,4	-0,5	-0,3	0,0	-0,3	0,2	-0,2	0,4	-0,4	-0,9	1,0	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3
suburbain	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,3	1,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
exigence1A	-0,2	-0,1	0,1	0,5	0,1	0,4	-0,3	-0,2	0,2	-0,5	0,4	0,2	-0,2	0,0	1,0	-0,8	-0,1	0,1
exigence1B	0,3	0,1	0,0	-0,3	0,1	-0,1	0,2	0,0	-0,2	0,4	-0,3	-0,1	0,1	0,0	-0,8	1,0	-0,5	0,1
exigence2A	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,4	0,1	0,3	0,0	0,1	-0,1	-0,2	0,2	0,0	-0,1	-0,5	1,0	-0,2
vit_max	0,3	0,4	-0,2	-0,2	0,4	0,6	-0,4	-0,3	0,1	0,3	-0,3	-0,3	0,3	-0,1	0,1	0,1	-0,2	1,0

Figure 6-8 : Matrice des corrélations des données du FMR pour la rétroréflexion

	delta_durab	durab_init	delta_date	somme_pluie	somme_neige	somme_abrasif	somme_sel	premiere_neige	autres_abrasifs	S_passages	delta_retro	retro_init	delta_date	somme_pluie	somme_neige	somme_abrasif	somme_sel	premiere_neige	autres_abrasifs	S_passages
delta_durab	1,0	0,6	0,6	0,2	0,5	0,5	0,6	0,6	0,1	0,3	1,0	0,9	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	0,2	0,4	0,2	-0,1

durab_init	0,6	1,0	0,6	0,3	0,6	0,2	0,3	0,6	0,2	0,4	0,9	1,0	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	0,3	0,2	-0,1	-0,3
delta_date	0,6	0,6	1,0	0,4	0,7	0,4	0,6	1,0	0,2	0,6	-0,3	-0,4	1,0	0,8	0,7	0,7	0,0	0,4	0,3	0,5
somme_pluie	0,2	0,3	0,4	1,0	0,5	0,2	0,2	0,2	0,0	0,4	-0,3	-0,4	0,8	1,0	0,9	0,5	-0,1	0,4	0,1	0,6
somme_neige	0,5	0,6	0,7	0,5	1,0	0,4	0,5	0,7	0,1	0,6	-0,2	-0,3	0,7	0,9	1,0	0,5	0,1	0,6	0,0	0,6
somme_abrasif	0,5	0,2	0,4	0,2	0,4	1,0	0,8	0,4	0,0	0,4	-0,3	-0,3	0,7	0,5	0,5	1,0	0,2	0,2	0,3	0,6
somme_sel	0,6	0,3	0,6	0,2	0,5	0,8	1,0	0,5	0,1	0,4	0,2	0,3	0,0	-0,1	0,1	0,2	1,0	0,4	0,2	0,2
premiere_neige	0,6	0,6	1,0	0,2	0,7	0,4	0,5	1,0	0,2	0,6	0,4	0,2	0,4	0,4	0,6	0,2	0,4	1,0	0,2	0,3
autres_abrasifs	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	1,0	0,5	0,2	-0,1	0,3	0,1	0,0	0,3	0,2	0,2	1,0	0,6
S_passages	0,3	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,6	0,5	1,0	-0,1	-0,3	0,5	0,6	0,6	0,6	0,2	0,3	0,6	1,0

Figure 6-9 : Matrice des corrélations des données de l'entretien hivernal pour la durabilité (à gauche) et la rétroréflexion (à droite)

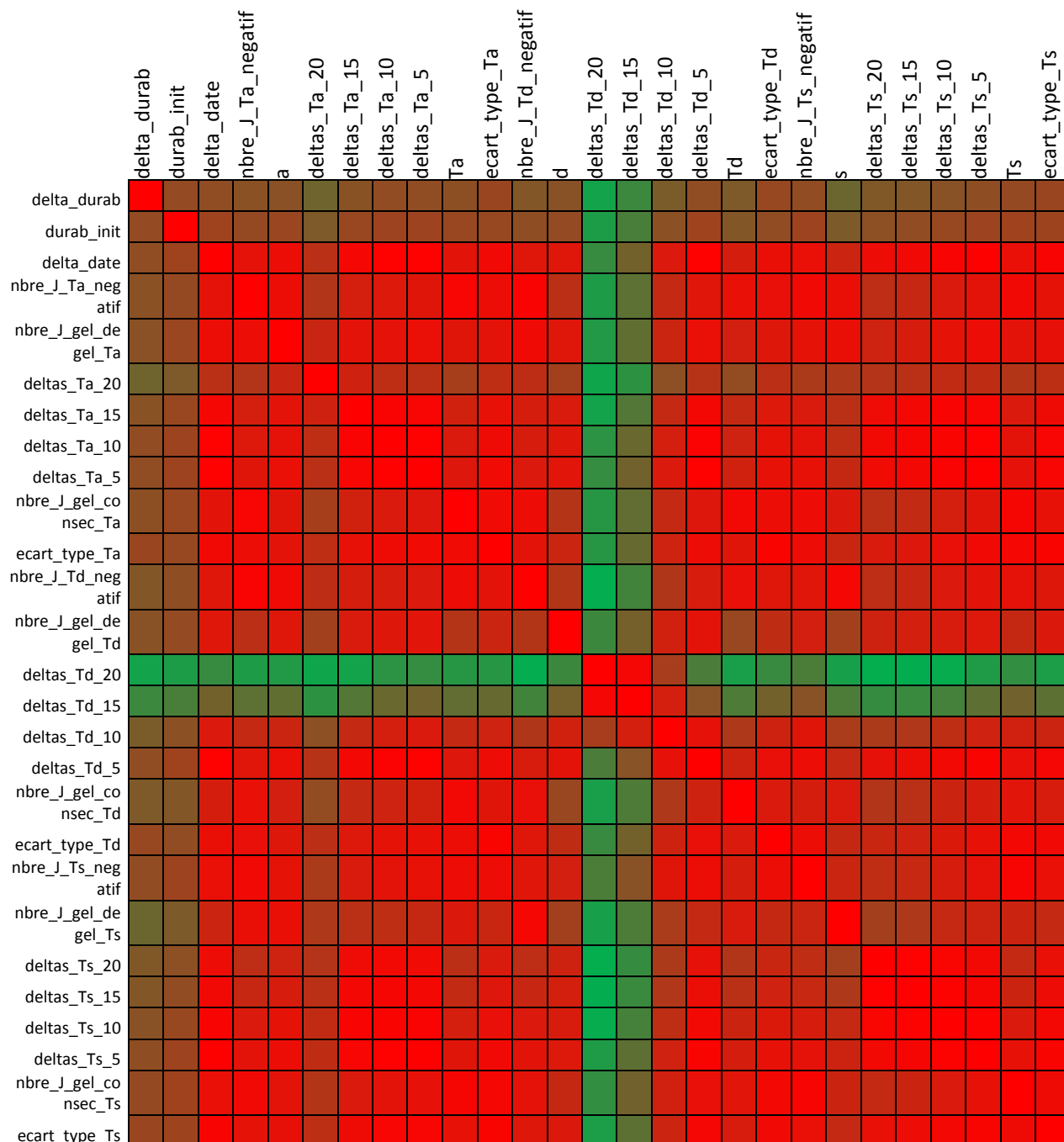


Figure 6-10 : Matrice des corrélations des données des SMR pour la durabilité

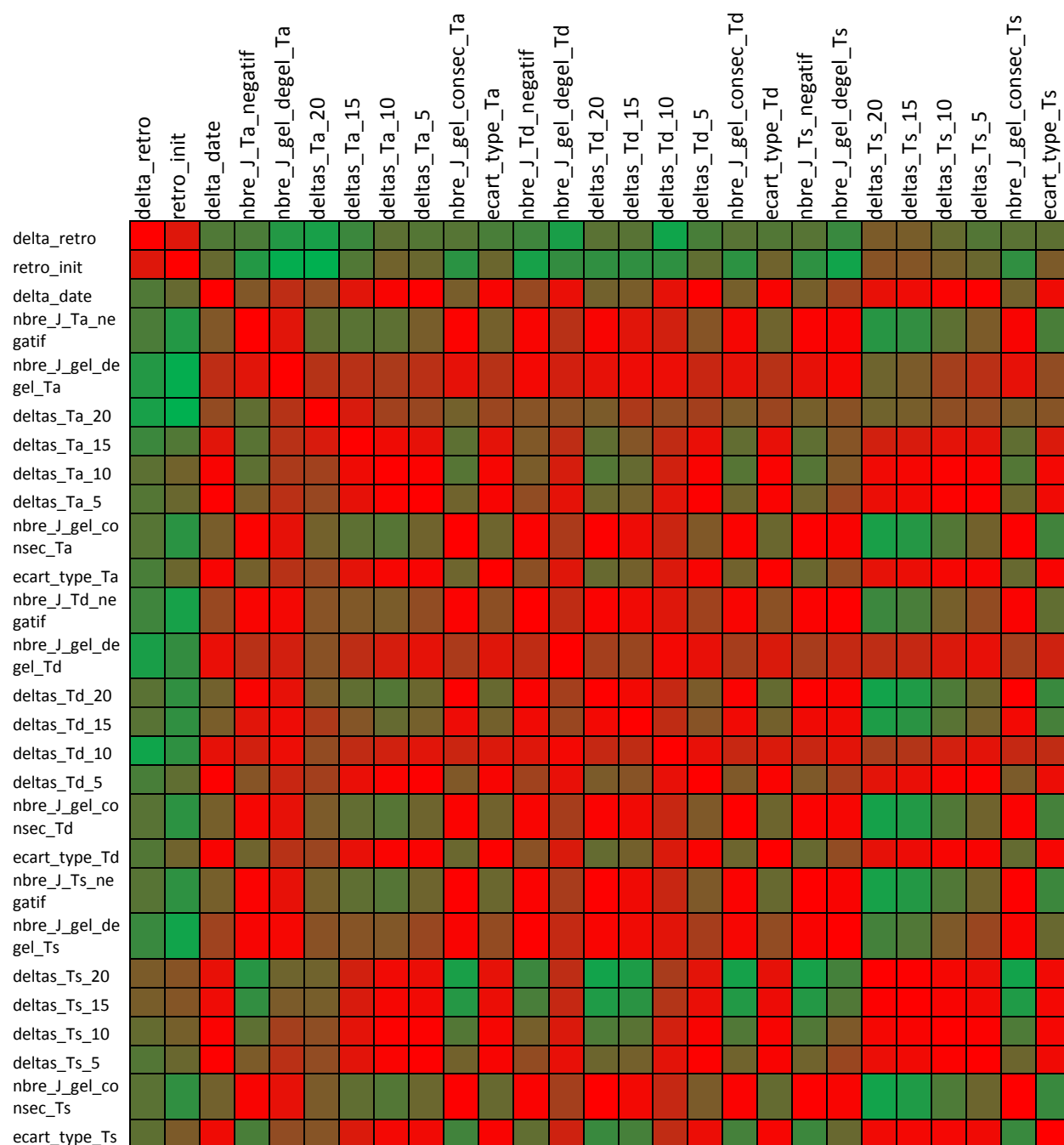


Figure 6-11 : Matrice des corrélations pour les données des SMR pour la rétroréflexion